Der Kohlebogen bei vermindertem Druck

Inaugural-Dissertation

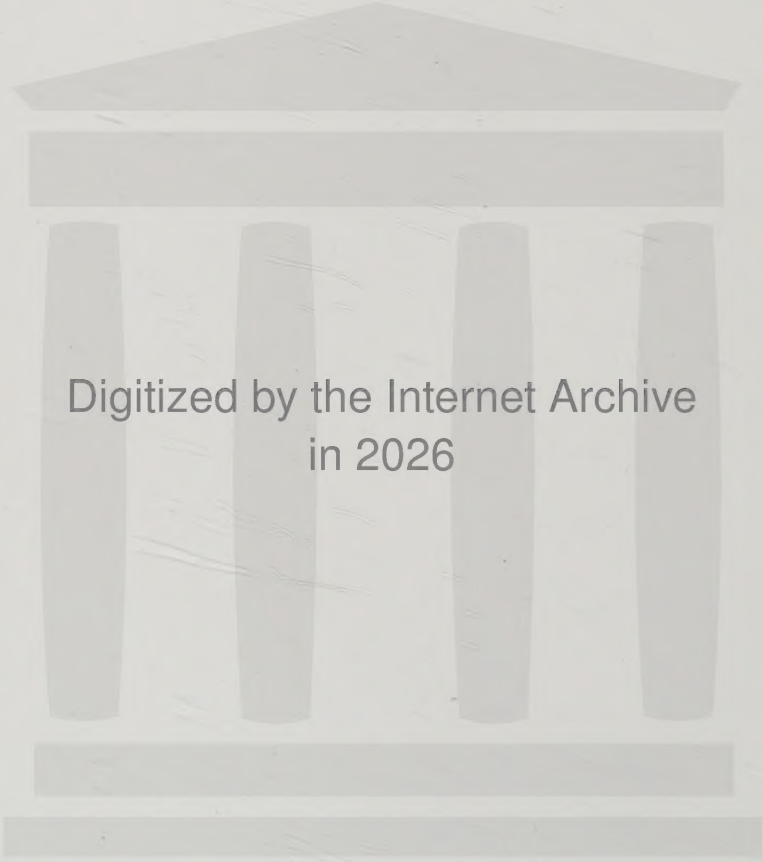
zur Erlangung der philosophischen Doktorwürde vorgelegt der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät der Universität Basel

von

Max Bider

von Basel

BASEL
Buchdruckerei Emil Birkhäuser & Cie.
1927


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545822_0055

Der Kohlebogen bei vermindertem Druck

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der philosophischen Doktorwürde vorgelegt der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät der Universität Basel

von

Max Bider

von Basel

BASEL
Buchdruckerei Emil Birkhäuser & Cie.
1927

Genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät auf Antrag der Herren Professoren Dr. A. Hagenbach und Dr. H. Veillon.

Basel, den 30. November 1926.

Prof. Dr. *H. Rupe*,
Dekan.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Der Kohlebogen bei vermindertem Druck.

A. Historische Übersicht.

Als Strahlungsquelle besonderer Art ist der elektrische Lichtbogen für Wissenschaft und Technik von grosser Bedeutung. Die zahllosen mit Hilfe des Bogens ausgeführten Spektralaufnahmen zeigen ihn als wichtigstes Hilfsmittel der Spektroskopie; des weiteren hat die Tatsache, dass im Bogen die höchste bekannte irdische Temperatur erzeugt wird, zu vielen Untersuchungen über Strahlungs- und Wärmewirkungen Anlass gegeben. So ist es nicht verwunderlich, dass der Bogen selbst, d. h. die ihn konstituierenden Elemente, in einer sehr grossen Anzahl von Untersuchungen studiert worden ist. Jede der vielfachen Modifikationen der Versuchsbedingungen, wie des Elektrodenmaterials, der Art und des Druckes des umgebenden Gases, der Bogenlänge, der Stromstärke und der angelegten Spannung, beleuchtet das komplexe Gebilde des Bogens von einer andern Seite.

Das uns hier besonders interessierende Teilgebiet: die Untersuchungen am Kohlebogen bei vermindertem Druck, ist in vielen Arbeiten behandelt worden, jedoch ohne dass die verwickelten Beziehungen allseitig klargelegt worden wären. Eine historische Zusammenstellung dieses Gebietes findet sich in der Dissertation von Hörburger (1), in der die wichtigsten bis 1904 erschienenen Arbeiten besprochen sind. Auch in dem Ayrton'schen Buch (2) über den elektrischen Lichtbogen sind im historischen Teil einige Untersuchungen bei vermindertem Druck erwähnt. Die neueren Ergebnisse finden sich in dem von Hagenbach (3) behandelten Abschnitt über den Lichtbogen im Handbuch für Radiologie. Auch im Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus von Graetz wird in einem von Bräuer (4) bearbeiteten Artikel auf die verschiedenen Arbeiten hingewiesen. Im folgenden werden nun die wichtigsten Arbeiten, die sich auf Untersuchungen des Bogens im luftverdünnten Raum beziehen, kurz skizziert. Im übrigen sei auf die Originalliteratur verwiesen.

Schon Davy (5) p. 134 [Entdeckung des Bogens 1808 (2) p. 25, Benennung desselben als „Arc“ 1821 (2) p. 28][1]) untersucht den Bogen unter vermindertem Druck. Er fand bereits, dass im Vakuum der Funken schon bei einer grösseren Elektrodendistanz überspringt als bei Atmosphärendruck, und dass auch beim Bogen der Elektrodenabstand im luftverdünnten Raum bedeutend länger gewählt werden kann als bei Atmosphärendruck, ohne dass der Bogen erlischt. [(6) p. 18, Anmerkung.] Reichlich 20 Jahre später beobachtete Van Breda (7) anlässlich der Untersuchungen über den Lichtbogen im luftverdünnten Raum die übrigens schon von Davy gefundene Funkenentzündung des Bogens, beschrieb das Auftreten von „Feuergarben“ und leuchtenden Kügelchen auf der Kathode und stellte durch Wägung der Elektroden fest, dass der Abbrand der Kohlen im luftverdünnten Raum bedeutend geringer ist als bei Atmosphärendruck. Da im Bogen eine erste Lichtquelle gefunden war, die ohne Zuführung frischer Luft resp. Sauerstoff unterhalten werden konnte, kamen einige Physiker auf den Gedanken, diese Eigenschaft des Bogens zur Konstruktion einer Grubenlampe zu benützen. Zu diesem Zwecke stellte Grove (8) verschiedene Versuche an, die aber zu keinem brauchbaren Resultate führten. Nach eingehenden Experimenten, bei denen der Bogen in Wasser, Wasserstoff, explosiblen Gasgemischen und Vakuum brannte, gelang es Boussignault (9) eine solche Lampe zu konstruieren. Mateucci (10) wiederholte u. a. die Versuche von van Breda über den Elektrodenabbrand im Vakuum und bestätigte dessen Ergebnisse. Depretz, (11) Untersuchungen ergaben keine wesentlich neuen Tatsachen. Er beschrieb das Aussehen des Bogens unter vermindertem Druck und bestätigte die Beobachtung Davys' von der Funkenzündung.

Wichtiger sind die Mitteilungen in der 1860 erschienenen Arbeit von Gassiot (12), worin er klar auf den Unterschied von Bogen und Glimmlicht hinweist und zum erstenmal die geschichtete Entladung erwähnt. Als Erkennungszeichen des Glimmlichtes wird die geringere Lichtintensität und kleinere Stromstärke als beim Bogen angeführt. Nachdem schon 1867 Edlund (13) die Vorgänge beim Bogen durch genaue systematische Messungen zu verfolgen begann, machten sich W. de la Rue und H. Müller (14) daran, den Einfluss der Druckverminderung auf die erforderliche Spannungsdifferenz zu messen.

[1]) In der deutschen Übersetzung (5) findet sich schon 1814 der Ausdruck „nach oben gekrümmter *Lichtbogen*“, während in der englischen Arbeit noch das Wort „arch“ gebraucht wird.

Es zeigte sich mit abnehmendem Druck eine Verminderung dieser Spannungsdifferenz, bei ganz geringem Druck ($^1/_{100000}$ Atm.) wurde wieder ein starkes Ansteigen gefunden (hohe Spannung, geringe Stromstärke). Die auftretende geschichtete Entladung wird nur als eine Modifikation des Bogens bei Atmosphärendruck aufgefasst und die Vermutung geäussert, dass es sich beim Übergang vom Bogen zum Glimmlicht um eine kontinuierlich verlaufende Erscheinung handle.

Hittorf (15) fand bei seinen Versuchen die wichtige Tatsache, dass eine Erhitzung der Elektroden das Zustandekommen und Brennen des Bogens unter vermindertem Druck sehr erleichtert und beobachtete auch, dass im partiellen Vakuum eine bedeutend geringere Elektrodenspannung zum Unterhalt des Bogens genügt. Einen Schritt weiter in der Systematik der Entladungserscheinungen beim Bogen unter vermindertem Druck führt die Arbeit von Stenger (16). Wenn er auch zum Ergebnis kommt, dass zwischen den Entladungsformen des Bogens und des Glimmlichts kein prinzipieller Unterschied besteht, so kann er doch einige typische Kennzeichen angeben, die die beiden Entladungserscheinungen charakterisieren. Die Eigenschaften des Glimmlichtes, verglichen mit denen des Bogens, sind: der grössere Widerstand, die heisse Kathode (beim Bogen Anode), ihre Zerstäubung (beider Elektroden beim Bogen) und das starke Hervortreten des Gasspektrums (beim Bogen herrscht das Spektrum des Elektrodenmaterials vor). Für das Zustandekommen des Glimmlichtes hält Stenger den Druck nicht für ausschlaggebend. Der Einfluss der Bogenlänge scheint ihm mindestens ebenso wichtig, tritt doch bei grosser Bogenlänge das Glimmlicht bedeutend leichter auf als bei kleiner. Diese interessanten Untersuchungen des Übergangs zwischen Bogen- und Glimmlicht werden ein Jahrzehnt später von Lehmann [(17) p. 370] wieder aufgenommen, im wesentlichen bestätigt und weitergeführt, indem er neue Übergangsformen beobachtet und beschreibt. Ein anschauliches Bild von der Mannigfaltigkeit dieser Entladungserscheinungen geben die Lehmanns Arbeit im Anhange beigefügten vielleicht etwas schematisch geratenen Zeichnungen. Unterdessen beschäftigten sich Duncan, Rowland und Todd (18) mit Bogenuntersuchungen unter vermindertem Druck, indem sie die Elektrodenspannung bei grösseren Bogenlängen und konstanter Stromstärke als Funktion des Druckes untersuchten; in der Gegend von einer Atmosphäre soll sich ein Minimum der Spannung zeigen. Zu ähnlichen Resultaten gelangte auch Monasch (19).

Die mühsamen Versuche, die L. Arons (20) am Bogen mit verschiedenen Elektroden bei vermindertem Luftdruck ausführte, ergaben, dass bei jedem Druck die Spannung mit zunehmender Stromstärke abnahm, dass also mit andern Worten überall eine fallende Charakteristik vorliege; auch er fand im allgemeinen eine Abnahme der Elektrodenspannung mit sinkendem Druck; dass einzelne Werte aus dieser Reihe herausfallen, braucht bei der Instabilität des Bogens unter stark vermindertem Druck (von 50 mm Hg an abwärts) nicht in Erstaunen zu setzen, ist doch hier die einzelne Messung grossen Zufälligkeiten ausgesetzt, auch kommen die verschiedenen Bogenformen als störend in Betracht. Systematische Versuche am Kohlebogen bei vermindertem Druck hat dann Child (21) angestellt, indem er nicht nur den Verlauf der gesamten Elektrodenspannung bis zu einem Druck von wenigen Millimetern Hg verfolgte, sondern auch durch Sondenmessungen Anoden- und Kathodenfall beobachtete. Nach seinen Messungen hat der Kathodenfall bei 100 mm Hg ein flaches Maximum; dann nimmt er stark ab, besonders von 30 mm an. Der Anodenfall vermindert sich stetig mit sinkendem Druck; das Gefälle in der Gassäule ist bis 50 mm Hg konstant und nimmt dann stark ab. In einer zweiten Arbeit (22) beschreibt Child das Auftreten dreier verschiedener Bogenformen (in Wasserstoff mit Graphitelektroden) und findet, dass bei der Glimmerscheinung an der Anode („Glimmbogen") der Anodenfall sich von 6 auf 15 V erhöht. Versuche am Metallbogen ergaben eine grosse Abhängigkeit von der Oxydbildung und überhaupt von chemischen Prozessen. Im selben Jahr erschien die bereits erwähnte Arbeit von Hörburger (1), worin der Einfluss des Druckes auf die Elektrodenspannung des in Luft brennenden Kohlebogens bei konstanter Stromstärke und verschiedener Bogenlänge systematisch studiert wird. Mit sinkendem Druck ergibt sich eine stetig abnehmende Elektrodenspannung, ein Ergebnis, das mit den Messungen von Duncan, Rowland und Todd (18) in Widerspruch steht, sich aber im wesentlichen mit den Resultaten von Child deckt.

Simon und Malcolm (23) erforschten das Verhalten des Bogens bei geringen Stromstärken. In der ausführlichen Arbeit, die die Erscheinungen des Bogens bei verschiedenen Elektroden und in verschiedenen Gasen behandelt, beschreiben die Verfasser den Einfluss auf das Aussehen des Bogens und auf die Charakteristiken. Es ergab sich eine Bestätigung der Ayrton'schen Gleichung bis zu den kleinsten Stromstärken. Mit Nachdruck wird auf eine Zwischenform zwischen Bogen und Glimm-

strom („Glimmbogen") hingewiesen, die in Luft nur bei vermindertem Druck an Kohlenelektroden beobachtet wurde; in Wasserstoff gelang es, eine Charakteristik dieser Bogenform aufzunehmen [(22) p. 476, (4) p. 551]. In demselben Jahr veröffentlichten Cady und Arnold (24) eine Arbeit, die sich mit dem Übergang des Bogens zum Glimmlicht und umgekehrt beschäftigt. An Kohle-Metallelektroden wurden zwei verschiedene „Stadien" konstatiert, die durch spektroskopische und elektrische Grössen eindeutig bestimmt sind. Bei den Kohleelektroden war der Übergang von einem zum andern Stadium nicht sehr deutlich ausgeprägt; es scheint sich um einen kontinuierlichen Übergang zu handeln [(23) p. 900]. In einer grossen Arbeit von Fabry und Buisson (25) über den Metallbogen werden Beobachtungen über zwei verschiedene Stadien (régimes), die sich in spektroskopischer und elektrischer Hinsicht voneinander unterscheiden, mitgeteilt; ob sich diese Formen mit denjenigen von Cady und Arnold decken oder mit ihnen vergleichbar sind, ist schwer zu entscheiden. Die Elektrodenspannung in Abhängigkeit vom Druck zeigt bei einer Stromstärke von 2 Amp. ein flaches Minimum bei etwa 150 mm Hg, ein deutliches Maximum bei 60 mm Hg und dann einen steilen Abfall.

Die von Hagenbach und Veillon (26) und (27) ausgeführte Arbeit am Cu-Bogen ist besonders für die Systematik der Bogenformen wichtig. Es werden 6 Bogenformen unterschieden, wovon 3 mit und 3 ohne Aureole. Der Glimmbogen (Kathodenansatz punktförmig, Anodenansatz flächenhaft) wird als Form 1, mit einer Aureole (Oxyd) als Form 1a bezeichnet. Analog bedeutet die Form 3 den normalen Bogen ohne Aureole, Form 3a denselben mit Aureole. Bei der Form 2 besteht die Anodenansatzstelle aus einem kugeligen Büschel, das die Kathode punktförmig berührt [vgl. (3) p. 40]. Die einzelnen Formen treten vorzugsweise in einem bestimmten Druckbereiche auf; bei 100 mm Hg konnten alle Formen erhalten werden. Jeder Form entspricht eine andere Charakteristik. Wie Banderet (28) durch Sondenmessungen nachgewiesen hat, entsprechen diesen Formen bestimmte Werte des Anodenfalles. Am Ni-Bogen fand Frey (29) dieselben Erscheinungen, wenn auch die a-Formen (nach Hagenbach) selten auftraten. Der Einfluss des Gasdruckes auf die Elektrodenspannung erwies sich als sehr gering. (Es wurde nur bis 80 mm Hg evakuiert.) Bei Untersuchungen an langen Bogen beobachtete Grotrian (30) besonders in Wasserstoff verschiedene deutlich ausgesprochene Bogenformen. In einer systematischen Arbeit von Chrisler (31) werden die Erscheinungen am Bogen

kleiner Stromstärken (0,02 –0,5 Amp.) behandelt und eine grössere Anzahl von Charakteristiken des Metall- und Kohlebogens und des Glimmlichts mitgeteilt. Wie zu erwarten, treten bei der hohen Netzspannung (1000—3000 V) und der geringen Stromstärke schon bei Atmosphärendruck die Erscheinungen auf, die bei den üblichen Stromstärken erst bei stark vermindertem Druck zustande kommen; die Ayrton'sche Gleichung scheint für die meisten Elektrodenmaterialien nur für Stromstärken über 0,4 Amp. zu gelten. Den Bogen unter denselben Versuchsbedingungen untersucht Moore (31) von der spektroskopischen Seite und findet je nach der Stromstärke verschiedene „Stadien", die sich durch ihr Spektrum unterscheiden. Von Kohn und Guckel (32) wurde der Kohlebogen bei vermindertem Druck untersucht und einige wenige Charakteristiken aufgenommen, um daraus die Ayrton'schen Konstanten zu errechnen. Es ergibt sich, dass die Elektrodenspannung mit abnehmendem Druck sinkt und die Hyperbelform der Charakteristik bis 48 mm Hg erhalten bleibt; ob die Frölich'sche Gleichung gilt, kann nicht entschieden werden, da die Messungen nur für 2 Bogenlängen (3 und 10 mm) durchgeführt wurden.

Diese kurze Übersicht der bisherigen Arbeiten zeigt, dass der Kohlebogen unter vermindertem Druck zwar von vielen Seiten studiert worden ist, dass aber eine systematische Untersuchung des Druckeinflusses auf die elektrischen Verhältnisse (Spannung und Stromstärke) nicht durchgeführt wurde. In der vorliegenden Arbeit wurde nun versucht, unter Ausschalten störender chemischer Prozesse den Einfluss des Druckes auf Stromstärke und Spannung systematisch zu messen und zugleich für die verschiedenen Modifikationen des Bogens bei vermindertem Druck (Glimmbogen, Zwischenform) charakteristische Kennzeichen zu finden, die eine analoge Klassifikation dieser Phänomene ermöglichen, wie dies z. B. beim Cu-Bogen geglückt ist. Während der erste Teil dieser Aufgabe nach einigen Vorversuchen in vollem Umfang durchgeführt werden konnte, stellten sich der Lösung des zweiten Teiles so grosse Schwierigkeiten entgegen, dass auf die weitere Durchführung verzichtet werden musste.

B. Eigene Untersuchungen.

I. Methode der Untersuchungen.

1. Die Versuchsanordnung.

Beim grössten Teil der Messungen brannte der Bogen in dem von Banderet (28) beschriebenen Kessel. Das Gefäss ist ein Kreuzrohr von etwa 8,5 dm^3 Inhalt. Die beiden seitlichen und die untere der vier Öffnungen waren fest verschraubt, die obere war durch eine abnehmbare Platte, an der die eine Elektrode isoliert befestigt war, mittelst einer Gummidichtung abgedichtet. In die eine Platte war eine Glasplatte von 6 cm Durchmesser und 5 mm Dicke eingefügt, um die Beobachtung des Bogens und die Messung der Bogenlänge zu ermöglichen. Zur Herstellung des gewünschten Druckes dienten mehrere an den seitlichen Platten angebrachte Schlauchansätze und Hahnen. Die Elektroden standen vertikal übereinander und wurden durch Stopfbüchsen in den Kessel eingeführt. Während die obere Elektrode zur Zündung des Bogens durch einen Hebel bewegt werden konnte, war die untere zur Feinregulierung mit einer Schraubeneinstellung versehen.

Bei allen Messungen wurden dieselben Kohlen verwendet, und zwar Homogenkohlen von 12 mm Durchmesser: Kinomarke Noris E A, C. Conradty Nürnberg.

Zur Messung der Bogenlänge (Abstand der Ansatzstellen des Bogens, beim Bogen unter vermindertem Druck findet keine deutliche Kraterbildung statt) wurde das Bild des Bogens auf eine Skala projiziert, welche die Bogenlänge in Millimetern abzulesen gestattete.

Als Pumpe wurde anfänglich eine Wasserstrahlpumpe verwendet, nachdem sich aber im Laufe der Untersuchung die Notwendigkeit einer möglichst vollkommen getrockneten Atmosphäre im Innern des Kessels herausstellte, wurde die Wasserstrahlpumpe durch eine zweistieflige Guerikpumpe ersetzt, die sich unter den gegebenen Bedingungen sehr gut bewährte. Schon nach wenigen Minuten Pumpens war der tiefste gewünschte Druck (2 mm Hg) erzielt. Zur Messung des Druckes diente zunächst ein gewöhnliches Quecksilbermanometer; als aber dann einige Male unerklärliche Explosionen auftraten, die das Manometer zertrümmerten, ersetzte ich es durch ein beidseitig offenes Instrument, das gleichzeitig als Sicherheitsventil wirkte. Trotzdem die Ablesung etwas umständlich war, wurde es für alle späteren Versuche beibehalten, um so mehr als die erforderliche Messgenauigkeit relativ gering war.

Den Betriebsstrom des Bogens lieferte das städtische Gleichstromnetz von 440 Volt Spannung. Die relativ hohe Spannung wurde im Hinblick auf die Erscheinungen des Glimmbogens bei geringen Stromstärken gewählt. Die Widerstände, die in geeigneter Weise in den beiden Zuführungen verteilt waren, bestanden anfänglich aus einem Wasserwiderstand und Schieberrheostaten, im Laufe der Untersuchung wurde der Wasserwiderstand durch Schieberwiderstände ersetzt, was sich in angenehmer Weise durch eine grössere Konstanz der Stromstärke bemerkbar machte.

Bei den Untersuchungen bei kleiner Stromstärke (weniger als ein Ampère) leisteten vier parallel geschaltete Gruppen von je zwei hintereinander geschalteten Glühlampen gute Dienste. Eine versuchsweise eingeschaltete Drosselspule mit Eisenkern hatte nicht den erwünschten Erfolg; sie übte auf die Strom- und Spannungsschwankungen keinen merklichen Einfluss aus, und fand deshalb bei den Messungen keine Verwendung.

Die Messung der Stromstärke und der Spannung zur Aufnahme der Charakteristiken erfordert angesichts der ständigen Schwankungen im Bogen ganz besondere Vorsichtsmassregeln. Da es sich hauptsächlich darum handelte, simultane Werte für Spannung und Stromstärke zu erhalten, wurden zunächst eingehende Versuche mit einem bei Trüb und Täuber hergestellten Registrierinstrument angestellt. Ein Volt- und ein Ampèremeter zeichnen auf derselben sich drehenden Trommel ihre Momentanwerte auf. Beide Instrumente beruhen auf dem Drehspulprinzip. Das Voltmeter kann für einen Spannungsbereich von 15 bis 80 Volt und von 30 bis 160 Volt verwendet werden; das Ampèremeter umfasst einen Stromstärkebereich von 0 bis 10 und von 0 bis 20 Amp. Die Registrierfedern sind senkrecht übereinander angeordnet und bewegen sich vertikal auf und ab; sie können beliebig stark gegen den Registrierstreifen gedrückt werden. Die Registriertrommel wird durch ein Uhrwerk in Drehung versetzt und kann so reguliert werden, dass der etwa 33 cm lange und 16 cm breite Streifen in einer Viertel- oder einer ganzen Stunde einmal an den Zeigern vorbeigeführt wird. Zur Auswertung der Streifen ist es notwendig, dass bei ausgeschaltetem Instrument eine „Nullinie" aufgezeichnet wird. Nachdem der Streifen von der Trommel abgenommen ist, kann von der Nullinie aus mittelst durchsichtiger Celluloidplättchen, auf denen eine dem Messbereich entsprechende Skala eingeritzt ist, Spannung und Stromstärke in Volt resp. Amp. abgelesen werden.

Die zahlreichen und langwierigen Versuche, die mit diesem Instrument angestellt wurden, ergaben leider nicht die erwünschten Resultate. Sehr störend war die Reibung der Federn auf dem Papierstreifen; sie bewirkte, dass bei der gleichen Spannung und Stromstärke verschiedene Werte aufgezeichnet wurden, je nachdem die vorhergegangene Spannung oder Stromstärke sich viel oder wenig von der nachher abzulesenden unterschied. Diese Reibungsfehler waren etwa von der Grössenordnung 1 bis 2 Volt. Durch eine Erschüttereinrichtung konnte dieser Übelstand etwas verringert werden. Eine weitere Schwierigkeit, die aber nicht in dem Instrument als solchem, sondern in den Verhältnissen des Bogens liegt, wird durch die Schwankungen der Bogenlänge verursacht. Durch die Aufzeichnungen sind wohl die zusammengehörigen Spannungen und Stromstärken bekannt; wenn man aber nicht noch die betreffende Bogenlänge kennt, so ist die Messung für die Aufnahme von Charakteristiken wertlos. Zusammenfassend lässt sich das Ergebnis etwa folgendermassen formulieren: bei Messungen am relativ stabilen Bogen ist das Registrierinstrument vorzuziehen, wenn es sich nicht um äusserste Genauigkeit handelt, überhaupt bei allen Messungen orientierenden Charakters, während bei genaueren Messungen wohl nur aperiodische Instrumente mit direkter Ablesung in Frage kommen.

In Anbetracht dieser Ergebnisse wurden für die vorliegende Untersuchung die überwiegende Mehrzahl der Messungen mit Instrumenten direkter Ablesung durchgeführt. Als Ampèremeter wurde ein Drehspulinstrument im Bereich von 0 bis 7 Amp. verwendet. Für grössere Stromstärken diente ein geeichter Nebenschluss, der den Messbereich auf das Dreifache erhöhte. Die Elektrodenspannung wurde mit einem Drehspulvoltmeter von Ruhstrat, Göttingen, gemessen; dazu wurden die Messbereiche von 0 bis 240 und von 0 bis 480 Volt benützt.

2. Versuchsbedingungen und Messmethoden.

Druck.

Die Durchführung der Versuche ergab bei Drucken über 100 mm Hg eine sehr geringe Druckabhängigkeit der Charakteristiken, so dass in diesem Bereich die Ablesungen nur auf Zentimeter genau sein mussten, bei tieferem Druck genügten im allgemeinen ganze Millimeter. Es wurden dann verschiedene Methoden angewandt, den Bogen in einer Atmosphäre von gewünschtem Druck brennen zu lassen. Zunächst erscheint es am

naheliegendsten, den Kessel auf den gewünschten Druck auszupumpen und ihn dann vollkommen zu verschliessen, darauf den Bogen zu zünden und den Kessel in diesem Zustande zu belassen. Auf diese Weise aber trat ein bedeutender Druckanstieg auf [vgl. HÖRBURGER (1) p. 25], der zum Teil auf die allmähliche Erwärmung, zum andern Teil aber, wie spätere Untersuchungen zeigten, auf chemische Erscheinungen zurückzuführen ist. Wollte man nun die Untersuchung bei konstantem Druck vornehmen, so musste man von Zeit zu Zeit während der Messung die Pumpe in Betrieb setzen (Abpumpen). Eine weitere Möglichkeit bestand darin, während der Messung etwas Gas auszupumpen und andererseits etwas Gas einströmen lassen, so dass der Bogen bei konstantem Druck im durchströmenden Gas brannte. Alle diese Verfahren wurden ausprobiert und jedes gab ein anderes Resultat, besonders bei tieferen Drucken. Bei der Aufnahme der Charakteristiken wurde gewöhnlich das Verfahren des konstanten Druckes durch Abpumpen gewählt.

Das eingeschlossene Gas.

Der grösste Teil der Untersuchungen wurde mit Luft als eingeschlossenem Gas durchgeführt. Bei einigen Versuchen orientierenden Charakters wurden CO_2, N_2 und H_2 (die Gase wurden Bomben entnommen) verwendet. Bei den Messungen mit eingeschlossener Luft wurde darauf geachtet, dass vor Beginn der Ablesungen der Sauerstoff im Innern des Kessels verbrannt war, wobei das Verschwinden der Aureole als Index diente [vgl. (1) p. 25]. Bei durchströmender Luft konnte man kurz nach dem Zünden konstante Gasverhältnisse annehmen, während beim Abpumpen dieser Zustand erst nach längerer Zeit zu erreichen war. Beim festverschlossenen Kessel liegen die Verhältnisse noch ungünstiger [vgl. (1) l. c.]. Versuche mit feuchter und trockener Luft ergaben interessante Resultate, die weiter unten besprochen werden sollen.

Temperatur.

Über die Temperatur ist nicht viel zu bemerken, weil bei allen Versuchen dieselben Bedingungen herrschten (ausgenommen bei gewissen Messungen, die mit einem anderen Kessel ausgeführt worden sind). Da am meistgebrauchten Kessel keine Kühlvorrichtung angebracht war, konnten damit keine länger dauernden Versuche als dreiviertelstündige ohne Unterbrechung bei einer

Stromstärke von über 3 Amp. ausgeführt werden, weil die Paraffindichtungen zu schmelzen begannen. Man wird kaum fehlgehen, wenn man die Temperatur des Kessels in diesem Fall auf etwa 50° schätzt. Die Verhältnisse beim gekühlten Kessel werden weiter unten geschildert.

Elektrische Verhältnisse.

Vor der eigentlichen Aufnahme der Charakteristiken versuchte ich die Stabilität des Bogens einigermassen zu sichern. Es zeigte sich bald, dass die Stabilität bei verschiedenem Druck recht verschieden war, sie ist am grössten bei etwa 400 mm Hg, aufwärts bis zu Atmosphärendruck war sie relativ gut, ebenso herunter bis etwa 50 mm Hg, von da an war es mit immer grösseren Schwierigkeiten verbunden, eine auch nur einigermassen stabile Form zu bekommen. Oft liess sich eine stabile Form dadurch erreichen, dass die Kohlen wieder in Kontakt gebracht wurden. Doch wurde dieses Verfahren mit der nötigen Vorsicht angewandt und nur dann, wenn keine andere Möglichkeit bestand. Sobald nämlich der Bogen an einer anderen Stelle ansetzte, änderte sich die Spannung; sie war im allgemeinen geringer; deshalb wurde mit den Ablesungen in diesem Falle etwas zugewartet.

Das einfachste Verfahren zur Aufnahme der Charakteristiken, das etwa folgendermassen verlaufen würde: Zündung des Bogens, Einstellung der Bogenlänge, Ausschalten des Widerstandes bis die gewünschte Stromstärke erreicht ist, Ablesung der Spannung, dann eine beliebige andere Stromstärke einreguliert, wieder Ablesung der Spannung, usw. ergibt nur ungenaue, fast unbrauchbare Werte; bei gleicher Stromstärke ist auf diese Weise die gleiche Spannung fast nicht reproduzierbar. Es ergab sich nämlich, dass die Elektrodenspannung cet. par. eine Funktion der Brenndauer des Bogens ist. (Einbrennen.) Diese Erscheinung machte sich bei allen Messungen in unangenehmer Weise bemerkbar, besonders beim „Springen“ und „Klettern“ des Bogens, bei neuem Kontakt der Kohlen, überhaupt bei jedem Ändern der Ansatzstelle des Bogens. Aus verschiedenen einleuchtenden Gründen ist es natürlich nicht möglich, für jede Stromstärke den Moment des Einbrennens abzuwarten, würde doch die Aufnahme einer solchen Charakteristik einige Stunden beanspruchen, die dadurch auftretenden Fehler würden die gewonnenen Vorteile in ihr Gegenteil verkehren. (Einfluss der Temperatur, der Kohlenabnützung, Druckänderung und eventuelle Änderung der Gas-

zusammensetzung usw.). Oft nahm übrigens nach erfolgtem Einbrennen die Stabilität des Bogens gar nicht zu, im Gegenteil, manchmal wurde mit längerem Brennen der Bogen unruhiger. Um den Einfluss des Einbrennens einigermassen zu eliminieren und doch andere grössere Fehler zu vermeiden, wurde für die meisten Versuche der folgende Weg eingeschlagen. Der Bogen wurde gezündet, auf die richtige Bogenlänge eingestellt und bei etwa 2 bis 3 Amp. einige Minuten brennen lassen, dann wurde in rascher Aufeinanderfolge die Stromstärke stufenweise vergrössert und gleichzeitige Ablesungen am Voltmeter durchgeführt, bis etwa 16 Amp. erreicht waren; in ebensolcher Weise wurde dann die Stromstärke bis zum Ausgangspunkt erniedrigt; die Dauer eines solchen Versuches betrug etwa 3 Minuten. Darauf wurde in analoger Weise bei grossen Stromstärken begonnen, dann rasch stufenweise auf kleine Stromstärken erniedrigt, um endlich wieder zur Ausgangsstromstärke anzusteigen. Auf diese Weise wurden immerhin brauchbare Resultate erzielt, allerdings fallen auch hier die Punkte der einzelnen Kurven nicht genau zusammen, aber die Differenzen sind geringer als bei anderen Kombinationen. Nach meinen Erfahrungen ist ein Zusammenfallen unter keinen Umständen zu erwarten und es bleibt nichts anderes übrig, als durch Mittelbildungen einen Einblick in den Verlauf zu gewinnen. Für die folgenden Charakteristiken wurde der mittlere Fehler der einzelnen Messung ausgerechnet; für die mit dem Registrierinstrument aufgenommenen Kurven ergaben sich die Werte:

	Druck	Bogenlänge	Volt
	740 mm	5 mm	± 3,4
	400 „	5 „	± 3,5
	40 „	8,5 „	± 4,1
für direkte Ablesungen:	740 „	8,5 „	± 2,4

Methode der Mittelbildung.

Bei den Ergebnissen der ersten Experimente versuchte ich durch rechnerische Zusammenfassung nahegelegener Einzelwerte eine brauchbare Darstellung der Charakteristik zu gewinnen. Die erzielten Ergebnisse waren nicht befriedigend und so wurde die Methode der graphischen Mittelbildung gewählt. Die Einzelwerte wurden auf Millimeterpapier aufgetragen und die Kurven derart gezogen, dass in bestimmten beliebig gewählten Abschnitten gleich viel Einzelwerte links wie rechts der Kurve zu liegen kamen.

Dieses Verfahren lieferte recht brauchbare Werte und wurde deshalb für die Bearbeitung der Messungsergebnisse verwendet.

3. Ergebnisse der Vorversuche.

Auftreten eines zeitlichen Spannungsanstieges.

Schon die Aufnahme weniger Charakteristiken bei tieferen Drucken liess erkennen, dass der zweite Teil der Charakteristiken immer bei höheren Spannungswerten lag, ob man nun die Messung bei grossen oder kleinen Stromstärken begann. Diese Erscheinung, die genaue Messungen verunmöglichte, musste zunächst geklärt werden, um ihren Einfluss zu berechnen oder zu eliminieren.

Nach verschiedenen vorläufigen Experimenten untersuchte ich die Spannung lediglich als Funktion der Zeit, indem Stromstärke, Bogenlänge und Druck (Abpumpen) konstant gehalten wurden. Die Spannung stieg mit der Zeit stark an, z. B. für eine Brenndauer von 34 Minuten von 78 auf 134 Volt, wenn ein Anfangsdruck von 70 mm Hg gewählt wurde. Bei Atmosphärendruck blieb der Effekt aus, je tiefer aber der Druck gewählt wurde, desto deutlicher machte sich die Spannungserhöhung geltend (nur bis zu 70 mm Hg untersucht).

Parallel dem Spannungsanstieg erfolgte ein Druckanstieg, der weit über den durch die Erwärmung bedingten Betrag hinausging; so hätte sich aus einem Versuch z. B. eine Temperaturerhöhung um 360° C der gesamten eingeschlossenen Luft ergeben! Dieses Resultat weist auf die entscheidende Rolle hin, die chemischen Vorgängen zuzuschreiben ist; gelegentliche Explosionen beim Zünden des Bogens liessen gleichfalls grosse chemische Prozesse vermuten. Die starke Abhängigkeit von der Bogenlänge (stärker als proportional) deutete auf einen grossen Einfluss der Gassäule hin.

Eine Atmosphäre von Stickstoff und von Kohlensäure (CO_2) zeigte den Effekt in ähnlicher Weise wie Luft.

Erst Messungen in sorgfältig getrockneter Luft brachten den Spannungsanstieg zum Verschwinden. Wenn durch eine in den Kessel gestellte Schale mit Wasser die Atmosphäre gefeuchtet wurde, verstärkte sich der Effekt. Damit schien der Wasserdampf von wesentlichem Einfluss auf den Spannungs-

anstieg, und es handelte sich nun darum, diese Vermutung durch quantitative Gasanalysen zu kontrollieren.

Das Ergebnis der Gasanalysen.

Um einen Einblick in die chemischen Prozesse zu bekommen, mussten die Gasanalysen unter möglichst verschiedenen Versuchsbedingungen ausgeführt werden. Zunächst wurde Luft durch den Kessel gesaugt und dann auf etwa 70 mm Hg ausgepumpt, darauf wurde der Bogen gezündet und so rasch wie möglich auf die gewünschte Bogenlänge und Stromstärke eingestellt, dies dauerte eine halbe bis zwei Minuten, und dann las ich in regelmässigen Abständen Spannung und Druck ab; nach Verlauf einer Stunde wurde der Bogen gelöscht. (Diese Versuche wurden in einem anderen, wassergekühlten Druckkessel, der von Hagenbach (34) angegeben und beschrieben ist, ausgeführt.) Bald darauf, in einzelnen Fällen auch erst eine bis zwei Stunden später, wurde der Gasinhalt mittelst einer geeigneten Handpumpe in ein Auffanggefäss unter Wasser abgepumpt, wobei natürlich darauf geachtet wurde, dass alle Luftspuren aus den Verbindungsschläuchen vorher entfernt waren. So war es möglich, das Gas ohne jede Beimengung oder sonstige Veränderung zur Analyse zu verwenden (vgl. z. B. die Schwierigkeiten, die Stockhausen (35) p. 92 bei seinen Versuchen zu überwinden hatte).

Die Gasanalysen selbst wurden nach den bekannten Absorptionsmethoden durchgeführt. Nachdem ein bestimmtes Volumen, gewöhnlich etwa 80 cm^3 in der Messbürette genau bestimmt war, wurde das Gas in eine Hempel'sche Absorptionspipette übergeführt, in der sich Kalilauge befand, um CO_2 zu absorbieren, dann wurde O_2 in einer ebensolchen mit Pyrogallol und Kalilauge gefüllten Pipette absorbiert (36). Zur Absorption von CO wurde eine Kupferchlorürlösung verwandt und endlich wurde die H_2-Menge mittelst einer Palladiumsolpipette bestimmt. Um festzustellen, ob sich im Gasrest auch Sumpfgas befinde, wurde der Gasrest in eine Explosionspipette überführt, nachdem zuvor das Volumen Gasrest $- O_2$ genau bestimmt war. Die ersten Versuche ergaben, dass keinerlei Sumpfgas vorhanden, und dass der ganze Rest als N_2 zu betrachten sei.

Die Ergebnisse der Gasanalysen sind recht interessant und lassen eindeutige Schlüsse über die verschiedenen sich hier abwickelnden chemischen Prozesse zu. Eine allgemeine Übersicht gibt die folgende Tabelle:

Tabelle I.

A	B					C					D			E
	CO_2	C_2	CO	H_2	N_2	CO_2	O_2	CO	H_2	N_2	p_o	p_n	p_{no}	
I	0.5	2.5	42.1	30.8	24.1	0.03	0.10	1.83	1.33	1.06	86	352	330	normal
II	—	—	55.1	21.9	23.0	—	—	1.58	0.63	0.66	87	288	250	„
III	—	—	39.9	25.2	34.9	—	—	0.90	0.57	0.79	81	226	204	„
VI	—	—	40.4	29.3	30.3	—	—	1.06	0.76	0.79	83	254	230	„
V	4.0	0.1	23.8	0.1	72.0						730			getrocknet
VI	2.4	0.8	25.0	0.4	71.4	0.22	0.08	2.30	0.04	6.85	742	835	807	„
VII			32.6	1.3	66.1	0.05		0.33	0.02	1.00	79	122	117	„
VIII	3.6		23.0	2.0	71.4	0.32		2.07	0.18	6.42	735	825	785	normal
XI	4.5	—	23.6	5.5	66.4	0.43	—	2.27	0.52	6.37	740	889	845	gefeuchtet
X	1.1	—	43.2	45.6	11.1	0.06	—	2.74	2.90	0.70	70	637	598	„

Die Rubrik A gibt die Nummer jedes Versuches an. In B sind die Ergebnisse der Analysen in Prozenten des Gesamtvolumens angegeben. Die Kolonne C zeigt die Partialvolumina in dm^3 der Gase. In der Rubrik D bezeichnet p_o den Druck bei Beginn des Versuches, p_n denjenigen der letzten Ablesung bei brennendem Bogen, als nach einer Stunde Brenndauer, p_{no} den Druck des abgekühlten Gases. In der Kolonne E bedeutet „normal", dass gewöhnliche frische Luft von Zimmertemperatur als Füllgas verwendet wurde; getrocknet und gefeuchtet wurde die Luft auf die oben angegebene Weise (vgl. p. 13).

Die Resultate zeigen, dass unter allen Versuchsbedingungen bedeutende chemische Reaktionen vor sich gehen. Während im Moment des Zündens das prozentuale Verhältnis der Gase immer dasselbe ist und etwa ein Fünftel Sauerstoff und vier Fünftel Stickstoff beträgt, zeigt das Endergebnis ganz andere Werte, die je nach den Versuchsbedingungen stark von einander abweichen. Zunächst ist der Sauerstoff gänzlich verschwunden, er hat sich zu CO oxydiert, CO_2 ist nur vereinzelt und in geringer Menge aufgetreten. Bei den Versuchen mit getrockneter Luft und bei denjeniegn bei Atmosphärendruck als Ausgangsdruck (Versuch V bis IX) setzt sich sozusagen das ganze Gasgemisch aus N_2 und CO zusammen. Anders liegen die Verhältnisse bei den Versuchen bei 70 mm Hg Ausgangsdruck und „normaler" und feuchter Luft (Versuch I bis IV und X), hier tritt ein grosser Prozentsatz H_2 auf, der von 22 bis 46% des Gesamtvolumens variiert, letztere Zahl wurde bei feuchter Luft erreicht.

a) Die chemischen Reaktionen.

Das bemerkenswerteste Ergebnis der Analysen scheint mir das sehr starke Auftreten von H_2 bei den Versuchen bei 70 mm

Hg zu sein, interessant ist auch der grosse Prozentsatz von CO. Nach den ersten Versuchen glaubte ich auf Freiwerden absorbierten Wasserstoffes schliessen zu müssen, diese Annahme hätte es auch erklärlich erscheinen lassen, warum der Wasserstoff nur bei niedrigem Druck auftrat. Bei näherem Zusehen ergab sich, dass man auch ein Freiwerden von O_2 anzunehmen hätte, um den grossen Anteil von CO zu erklären. Aus der folgenden Tabelle II, die eine Gegenüberstellung des End- und Anfangszustandes der Gase in Partialvolumina in dm^3 ausgedrückt enthält, lässt sich das eben Gesagte genauer verfolgen:

Tabelle II

	A		B		C			D
No.	N_2	O_2	N_2	CO	H_2	ΔO_2	H_2	$H_2 - H_2$
I	0.77	0.19	1.06	1.83	1.33	+0.84	1.68	0.35
II	0.77	0.19	0.66	1.58	0.63	+0.60	1.20	0.57
III	0.77	0.19	0.79	0.90	0.57	+0.26	0.52	0.05
IV	0.77	0.19	0.79	1.06	0.76	+0.34	0.68	0.08
V	6.64	1.76	—	—	—	—	—	—
VI	6.64	1.76	6.85	2.30	0.04	−0.31	—	0.04
VII	0.77	0.19	1.00	0.33	0.02	−0.02	—	0.02
VIII	6.64	1.76	6.42	2.07	0.18	−0.40	—	0.18
IX	6.64	1.76	6.37	2.27	0.58	−0.20	—	0.52
X	0.73	0.17	0.70	2.74	2.90	+1.14	2.28	0.52

Aus den Daten der Rubrik A und B, die z. T. aus der Tabelle I übernommen sind, lässt sich z. B. aus dem O_2-gehalt des Anfangszustandes der CO-gehalt des Endzustandes berechnen. Als Beispiel mögen die Zahlen des III. Versuches dienen. Die chemische Reaktion verläuft nach folgender Gleichung:

$$O_2 + 2\,C = 2\,CO \qquad (1)$$
$$1\ \text{Vol} + \ O = 2\ \text{Vol}$$

d. h. aus einem Volumen Sauerstoff werden bei seiner Verbrennung zu Kohlenmonoxyd zwei Volumina dieses Gases, im vorliegenden Fall würden sich aus den 0,19 dm^3 O_2 0,38 dm^3 CO bilden, in Wirklichkeit aber wurden 0,90 dm^3 gemessen, also muss O_2 irgendwo frei geworden sein, und zwar ergibt sich wiederum nach (1), nur im umgekehrten Sinn gelesen $\frac{0{,}90 - 0{,}38}{2} = 0{,}26$ dm^3. Es hat nun etwas recht Unbefriedigendes, anzunehmen, dass die 0,26 dm^3 O_2 und die 0,57 dm^3 H_2 beide aus der Kohle stammen sollten. Eine viel einleuchtendere Erklärung gaben dann die Versuche mit getrockneter Luft, wo sich zeigt, dass z. B. bei Versuch VII

der CO-gehalt von 0,33 dm^3 sehr gut mit dem zu erwartenden von 2.0,19 = 0,38 dm^3 übereinstimmt und zugleich kein Wasserstoff auftritt. Der Sauerstoff und der Wasserstoff gehen also nicht von der Elektrode aus, denn sonst hätte bei getrockneter Luft derselbe Effekt wie bei „normaler" Luft auftreten müssen. Die Versuche mit feuchter Luft zeigten nun, dass das Auftreten von Wasserstoff und Sauerstoff von der Luftfeuchtigkeit (Wasserdampf herrührt, dass also beide Gase durch Dissoziation des Wasserdampfes entstehen müssen. Man sieht leicht ein, dass unter dieser Annahme nach der Zersetzungsgleichung:

$$\begin{aligned} 2\,H_2O &= O_2 + 2\,H_2 \\ O &= 1\ \text{Vol} + 2\ \text{Vol} \end{aligned} \qquad (2)$$

eine doppelt so grosse Menge Wasserstoff als Sauerstoff auftreten muss. In der Tat zeigt sich z. B. beim III. Versuch:

$$\text{Vol}\,O_2 : \text{Vol}\,H_2 = 0{,}26 : 0{,}57 = 1 : 2.$$

Auf die angegebene Weise ist nun diese Gesetzmässigkeit für alle Versuche durchgerechnet worden und in Tabelle II zusammengestellt. Zur Kolonne ΔO_2 in Rubrik C ist zu bemerken, dass hier auch eventuell auftretender freier Sauerstoff und Kohlendioxyd berücksichtigt wurden, letzteres nach der Gleichung:

$$\begin{aligned} O_2 + C &= CO_2 \\ 1\ \text{Vol} + O &= 1\ \text{Vol} \end{aligned} \qquad (3)$$

Negative Werte von O_2, mögen durch Bildung fester Oxydationsprodukte von Verunreinigungen der Kohlen erklärt werden. (Graubrauner Niederschlag auf den Elektroden!) Diese Verunreinigungen geben vermutlich zu den Unregelmässigkeiten bei den einzelnen Versuchen Anlass, soweit nicht die relativ grossen Messfehler dafür verantwortlich zu machen sind. In Rubrik D ist zur Veranschaulichung der Verhältnisse aus dem ohne bestimmte Annahmen errechenbaren O_2-gehalt der H_2-gehalt ermittelt worden, der resultieren würde, wenn beide Gase durch Wasserdampfdissoziation entstanden wären, entsprechen Gleichung (2). Den negativen Werten ΔO_2 entsprechen natürlich H_2-werte vom Betrage null. In der letzten Reihe ist die Differenz zwischen dem beobachteten und dem errechneten H_2-gehalt angeschrieben. Man sieht, dass die Abweichungen nicht exzessiv gross sind, sie neigen deutlich nach der positiven Seite, auch dies weist darauf hin, dass Oxyde auftreten, die sich im Gasinhalt nicht bemerkbar machen.

Die Frage, weshalb bei tiefen Drucken die Dissoziation des Wasserdampfes so stark auftritt und bei Atmosphärendruck kaum bemerkbar ist, mag in der Tatsache eine Erklärung finden, dass der Partialdampfdruck des Wasserdampfes bei niedrigen Drucken von relativ grösserer Bedeutung ist, und dass zur Überwindung des Druckes in diesem Fall eine geringere Energie aufzuwenden ist. Von Einfluss mögen auch die vom Druck abhängigen Vorgänge der Diffusion und der Turbulenz sein.

b) Die begleitenden Druck- und Temperaturverhältnisse.

Schon in Tabelle I sind die teilweise gewaltigen Drucksteigerungen verzeichnet, die während der Versuchsdauer von einer Stunde auftraten. Um die Druckverhältnisse besser studieren zu können, seien die Druckwerte der einzelnen Versuche nochmals angeführt, und zugleich die beobachteten Temperaturen des Kühlwassers verzeichnet:

Tabelle III

No.	p_o	p_n	p_{no}	$\frac{p_n}{p_o}$	$p_n - p_o$	Δt in C° beob.	Δt berech.
I	86	352	330	4.8	266	18°	
II	87	288	250	3.3	201	19,4°	41°
III	81	226	204	2.8	145	18,5°	29°
IV	83	254	230	3.0	171	20,5°	
V	730					21,5°	
VI	742	853	807	1.1	111	8,4°	15°
VII	79	122	117	1.5	43	12,2°	
VIII	735	825	807	1.1	90		13°
IX	740	889	845	1.2	149	12,8°	
X	70	637	589	9.1	567	19.8°	

Die ersten 4 Kolonnen sind aus Tabelle I übertragen, in der 5. Kolonne ist der Quotient, in der 6. die Differenz des Ausgangs- zum Endzustand angegeben, in diesen beiden Zahlen ist also sowohl die chemisch als auch die thermische Wirkung enthalten. In der 7. Reihe ist die Temperaturerhöhung des Kühlwassers nach Ablauf des Versuches angegeben, die Unterschiede bei den einzelnen Versuchen sind nicht nur auf innere Ursachen zurückzuführen, sondern rühren z. T. von der verschiedenen Menge des Kühlwassers her. Die letzte Rubrik gibt die aus den Druckmessungen p_n und p_{no} errechneten Temperaturerhöhungen an.

Der Quotient $\frac{p_n}{p_o}$ schwankt zwischen sehr weiten Grenzen, je nach den Versuchsbedingungen zwischen 1,1 und 9,1. Bei

Atmosphärendruck als Ausgangspunkt bleibt dieser Quotient innerhalb der Werte 1,0 und 1,3, während er bei 70 –80 mm Hg von 1,5 bis 9,1 ansteigt. Bei den Versuchen mit getrockneter Luft (V bis VII), wo keine grossen chemischen Umsetzungen ausser der Verbrennung des Sauerstoffes mit Kohle zu CO stattfinden, ist der für die Wärmeausdehnung in Betracht kommende Anteil recht klein. Aus den Temperaturmessungen und der errechneten Temperatur folgt auch, dass die durchschnittliche Temperatur des eingeschlossenen Gases etwa 60° betragen mag, jedenfalls ist sie nicht so hoch wie Stockhausen (35) p. 108 f. sie, allerdings unter etwas andern Bedingungen, schätzt.

c) Die begleitenden elektrischen Erscheinungen.

Die bei diesen Experimenten beobachteten Spannungen sind in der folgenden Tabelle IV zusammengestellt:

Tabelle IV

No.	V_o	V_n	$V_o - V_n$	$V_n - V_{om}$	H_2 in %
I	90	142	52	58	31
II	88	140	52	56	22
III	80	130	50	46	25
IV	74	134	60	48	29
V	84	88	4	4	–
VI	80	90	10	6	–
VII	78	86	8	2	1
VIII	86	82	4	2	2
IX	88	94	6	10	5
X	94	160	66	76	47

Unter V_o ist die Elektrodenspannung in Volt zu Beginn des Versuchs angegeben, doch sind diese Zahlen nicht sehr zuverlässig, da es naturgemäss bei den einzelnen Versuchen verschieden lang dauerte, bis Bogenlänge und Stromstärke genau einreguliert waren; der Spannungsanstieg ist am Anfang besonders stark, so dass eine Zeitdifferenz von zwei Minuten schon mehrere Volt Spannungsunterschied ausmachen kann. V_n gibt die letzte Spannungsablesung an, dieser Wert ist genauer, allerdings kommen hier Unregelmässigkeiten beim Brennen des Bogens in Betracht. Die nächste Kolonne verzeichnet den Spannungsanstieg. Die Differenz $V_n - V_{om}$ gibt den Spannungsanstieg von der mittleren Anfangsspannung aller Messungen. Trotz der ziemlich grossen Divergenzen in den Anfangsspannungen glaube ich annehmen zu dürfen, dass im ersten Moment die Elektrodenspannung

bei allen Versuchen annähernd gleich gewesen sein mag. Der Druckeinfluss macht nur etwa 4 Volt aus, und die verschiedenen Versuchsbedingungen („normal" oder feucht oder trocken) sollten im ersten Moment, wo noch keine chemische Reaktion angenommen werden kann, keinerlei Einfluss auf die Elektrodenspannung haben. In der letzten Kolonne sind die Werte von H_2 in Prozenten des Gesamtvolumens aus Tabelle I übernommen.

Der bemerkenswerteste Zug in der Tabelle IV ist der recht deutliche Parallelverlauf des Spannungsanstieges und des Prozentgehaltes der Gasatmosphäre an Wasserstoff. Bei Versuchen in reiner Wasserstoffatmosphäre lag die Spannung noch wesentlich über den Werten der obigen Versuche. Der verwendete Wasserstoff war technisch rein und wurde einer Bombe entnommen. Unter denselben Bedingungen wie bei den vorhergehenden Versuchen erhält man hier eine Elektrodenspannung von ca. 190 V; oder, wenn man von Luft zu reinem Wasserstoff übergeht, einen Spannungsanstieg von 106 V. In Leuchtgas, das etwa 40 bis 50% H_2 enthält, liegt die Anfangsspannung ungefähr 70 V über derjenigen der Luft. Durch alle diese Tatsachen scheint mir die Aussage, dass der beobachtete Spannungsanstieg eine Folge des sich bildenden Wasserstoffes sei, wohl begründet und vollauf berechtigt. Auch der Verlauf im einzelnen lässt sich ohne Schwierigkeiten aus diesen Ergebnissen ableiten.

Dass auch für den Spannungsanstieg bei Atmosphären von CO_2 und N_2 die Bildung von Wasserstoff verantwortlich zu machen ist, scheint mir kein gewagter Schluss, auch wenn keine Gasanalysen vorliegen.

II. Ergebnisse der Untersuchungen.

Einleitung.

Die Resultate der Voruntersuchungen zeigen die grosse Bedeutung des Feuchtigkeitsgehaltes des eingeschlossenen Gases. Um in der Folge genau definierte Verhältnisse zu haben, wurden alle Messungen in einer durch P_2O_5 getrockneten Atmosphäre ausgeführt. Wie die Vorversuche aufs deutlichste bewiesen (vgl. p. 17 f.), traten unter diesen Vorsichtsmassregeln keine Störungen auf; eventuell doch vorhandene Einflüsse des Feuchtigkeitsgehaltes wären durch die Art der Messung (kurz aufeinander folgende Aufnahme der Charakteristiken) deutlich zum Vorschein

gekommen. Durch das sorgfältige Trocknen der eingeschlossenen Luft ist in dieser Arbeit eine Quelle wesentlicher Fehler früherer Untersuchungen ausgeschaltet worden.

Bei den Untersuchungen bei tieferem Druck (unter 100 mm Hg) traten verschiedene Bogenformen auf, die sich durch das Aussehen der Entladung [Ansatz der Strombahn an den Elektroden, Form der Strombahn, eventuell auch Farbe derselben; wahrscheinlich auch spektroskopisch nachzuweisen (vgl. (31), (32)] und Veränderung der Elektrodenspannung unterscheiden. Infolge der Instabilität einzelner dieser Erscheinungsformen ist es nicht immer geglückt, alle wesentlichen Entstehungsbedingungen zu beobachten, so dass einigen dieser Messungen etwas Unsicheres anhaftet.

Manche Formen waren auch nur sehr bedingt reproduzierbar. Von allen diesen Formen aber hebt sich der normale Bogen als die Form heraus, die im gesamten untersuchten Druckbereich (von 740 mm Hg bis 5 mm) und in einem Stromstärkegebiet von 3—15 Amp. weitaus am häufigsten auftritt, und deren Aussehen und Elektrodenspannung cet. par. sich mit dem Druck kontinuierlich ändert. So ist es wohl gegeben, die Erscheinungen des normalen Bogens gesondert von denjenigen des Glimmbogens und der „Zwischenform" zu betrachten, nicht nur im Hinblick auf die innere Verschiedenheit der Phänomene, sondern auch in Anbetracht der verschiedenen Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messungen.

1. Der normale Bogen.

Der normale Bogen ist einerseits durch sein Aussehen, besonders durch den punktförmigen Anodenansatz, andererseits auch durch die Grösse und Stabilität der Elektrodenspannung gekennzeichnet. Ist nämlich die Elektrodenspannung des normalen Bogens bei bestimmten Verhältnissen bekannt, so liegt dann weiter der normale Bogen vor, wenn sich diese Elektrodenspannung bei kontinuierlicher Änderung der übrigen Variabeln ebenfalls kontinuierlich ändert. Bei tiefem Druck (unter 20 mm Hg) und Stromstärken unter 2 Amp. sind die angegebenen Kennzeichen nicht ausreichend: Der Übergang vom normalen Bogen zu einer andern Form scheint kontinuierlich zu verlaufen, und zwar in bezug auf das Aussehen wie die Elektrodenspannung [vgl. (37)].

a) Das Aussehen.

Für das Aussehen der Bogenentladung ist das umgebende Gas von Bedeutung. So kann man es wohl verstehen, dass sich

das äussere Bild des Bogens stark verändert, je nachdem man den Bogen eingeschlossen oder in strömendem Gas untersucht. Schon wegen des Einflusses der Luftfeuchtigkeit wurden allein die Verhältnisse im eingeschlossenen Raum der Untersuchung unterzogen. Beim eingeschlossenen Bogen fehlt wegen des Mangels an frischem Sauerstoff die Aureole, oder sie ist wenigstens nur andeutungsweise ausgebildet (vgl. p. 14). Das Aussehen des normalen Bogens ist nur in geringem Mass vom Druck des umgebenden Gases abhängig. Bei Atmosphärendruck beobachtet man zwischen den Kohlen einen länglichen violetten Kern, der von einem ganz schwach leuchtenden grün-blauen Mantel umgeben ist. Die Ausdehnung der violetten Strombahn nimmt mit zunehmender Stromstärke und abnehmendem Druck zu. Bei grösseren Stromstärken (über 5 Amp.) und tieferem Druck (unter 30 mm Hg) erhält der violette Kern eine bläulich-weisse Tönung, die Umrisse werden zugleich verwaschen und die Anodenansatzstelle hat die Neigung, sich zu verbreitern. Unter gewissen Bedingungen tritt Schichtung auf. Verglichen mit andern Formen, ist der normale Bogen relativ stabil; bei mittlerem Druck (200 bis 400 mm Hg) ist die Stabilität am grössten, mit abnehmendem Druck wird sie rasch geringer, aber auch bei Atmosphärendruck ist sie etwas kleiner als bei 400 mm Hg. Die geringe Stabilität bei tiefem Druck zeigt sich z. B. darin, dass die Entladung gelegentlich nicht den kürzesten Weg von der Spitze der Kathode zur nächstgelegenen Stelle der Anode wählt, sondern an weiter entfernten Stellen der Anode ansetzt; so konnten Fälle beobachtet werden, wo die effektive Bogenlänge das Vielfache des Elektrodenabstandes ausmachte. Bei tiefem Druck bestand oft Neigung des Bogens zur Wandung des gusseisernen Kessels überzugehen. Zur Vermeidung dieses Übelstandes musste der Kessel mit Asbest ausgekleidet werden. Ob diese letzterwähnten Erscheinungen alle dem normalen Bogen angehören, liess sich nicht entscheiden, aber es mag sehr wohl der Fall gewesen sein.

b) Die Elektrodenform.

Die Elektrodenform ist beim Kohlebogen von Mrs. Ayrton genau untersucht worden, und sie hat verschiedene Zusammenhänge zwischen den elektrischen Verhältnissen und der Form der Elektroden, die sich nach längerer Brenndauer ausbilden, nachgewiesen. Als besonders charakteristisch erwiesen sich die Bildung eines Kraters an der Anode und ein Zuspitzen der Kathode an der Stelle grösster Stromdichte; die Erscheinung wird mit zu-

nehmender Stromstärke und abnehmender Bogenlänge deutlicher ausgeprägt (vgl. (2) Fig. 3, 4 ff.). Unter Umständen kann es recht lange dauern, bis sich ein Gleichgewicht zwischen den verschiedenen auf- und abbauenden Kräften, die die Elektrodenform bestimmen, herausgebildet hat. [Einbrennen bis $^3/_4$ Stunde! (vgl. (2) p. 106).] Da aus den oben angegebenen Gründen (vgl. p. 15) bei den vorliegenden Untersuchungen das Einbrennen nicht abgewartet wurde, ergeben die Beobachtungen der Elektrodenform mehr zufällige Befunde. Bei abnehmendem Druck cet. par. hat der Anodenkrater die Neigung, sich zu verkleinern, entsprechend der schmäleren Strombahn, auch bildet sich der kleine Krater oft nicht direkt gegenüber der Kathodenansatzstelle, sondern mehr oder weniger weit davon entfernt. Wahrscheinlich spielt die lokale Beschaffenheit der Kohle die ausschlaggebende Rolle zur Bevorzugung einer bestimmten Stelle, oft bewegt sich der Anodenansatz ohne ersichtlichen Grund an eine andere Stelle der Anode und bildet einen Krater, so dass eine Anode nach einer Versuchsreihe oft mehrere Krater aufweist. Das Zuspitzen der Kathode, das beim eingeschlossenen Bogen nicht so deutlich auftritt wie beim offenen, scheint bei tieferem Druck ganz auszubleiben; die ganze Oberfläche nimmt eine konvex abgerundete regelmässige Form an. Das ständige Herumspringen des Kathodenflecks scheint im Endergebnis diese ausgeglichene Form zu erzeugen.

c) Die Charakteristiken.

Zur Untersuchung der elektrischen Verhältnisse des Lichtbogens stehen uns verschiedene Methoden des Vorgehens zu Gebote. Abgesehen von spektroskopischen Aufnahmen, die uns auch etwas über die elektrischen Verhältnisse aussagen können (ev. Starkeffekt, Auftreten bestimmter Linien [Linien des ionisierten Elementes, (25) und (32)]) ist man auf direkte Methoden angewiesen. Für den Gleichstrombogen kommen vor allem Sondenmessungen und Aufnahme der Charakteristiken in Betracht, wenn man von der Ringmethode nach Matthies (38) absieht, die nur unter ganz speziellen Bedingungen angewendet werden kann. In gewissen eindeutigen Fällen mag man der Sondenmethode den Vorzug geben, im allgemeinen aber vermag wenigstens beim jetzigen Stand der Sondenmessungen, die Aufnahme der Charakteristiken ebensoviel zu leisten. Wenn auch zunächst die Methode der Charakteristiken nur eine Pauschalübersicht gestattet und die Sondenmessung ein Eingehen auf einzelne Teile des Bogens (Anodenfall, Kathodenfall und Gassäule) verspricht, so liegen

bei näherem Zusehen die Dinge nicht so einfach. Gerade neuere und neueste Arbeiten, auf die ich noch zurückkomme, weisen auf die grossen Schwierigkeiten und systematischen Fehler der Sondenmessungen hin, während andererseits sich aus der Deutung der AYRTON'schen Konstanten der Charakteristiken recht befriedigende Schlüsse ziehen lassen. (Die empirischen Beziehungen zwischen diesen Konstanten und Anoden-, Kathodenfall und Gradient in der Gassäule konnten natürlich auch nur mittelst Sondenmessung ermittelt werden.) Angesichts dieser Tatsachen wird man es wohl begreifen, dass in dieser Arbeit neben der Aufnahme der Charakteristiken nicht auch noch Sondenmessungen ausgeführt wurden. Zur physikalischen Deutung der Vorgänge und zu ihrer theoretischen Erfassung wäre an Stelle der Stromstärke die Messung der Stromdichte erwünscht. Beim Kohlebogen ist aber die Messung dieser Grösse, die auf der Ausmessung des Kathodenfleckes beruht, mit Schwierigkeiten verbunden, auch würde sich bei den instabilen Verhältnissen des Bogens unter vermindertem Druck nur eine ganz ungenügende Genauigkeit erreichen lassen. Bei Messungen am Hg-Bogen (39) ergab sich übrigens, dass die Stromdichte unabhängig von der Stromstärke und der Bogenlänge sei, indem sich mit zunehmender Stromstärke die Fläche des Kathodenfleckes (resp. der Strombahn) entsprechend vergrössert. Ob dieses Gesetz beim Kohlebogen und gar unter vermindertem Druck auch gilt, ist natürlich eine Frage, die man noch prüfen müsste, die allerdings durch gewisse Beobachtungen (vgl. Abschnitt über das Aussehen des Bogens) plausibel gemacht wird.

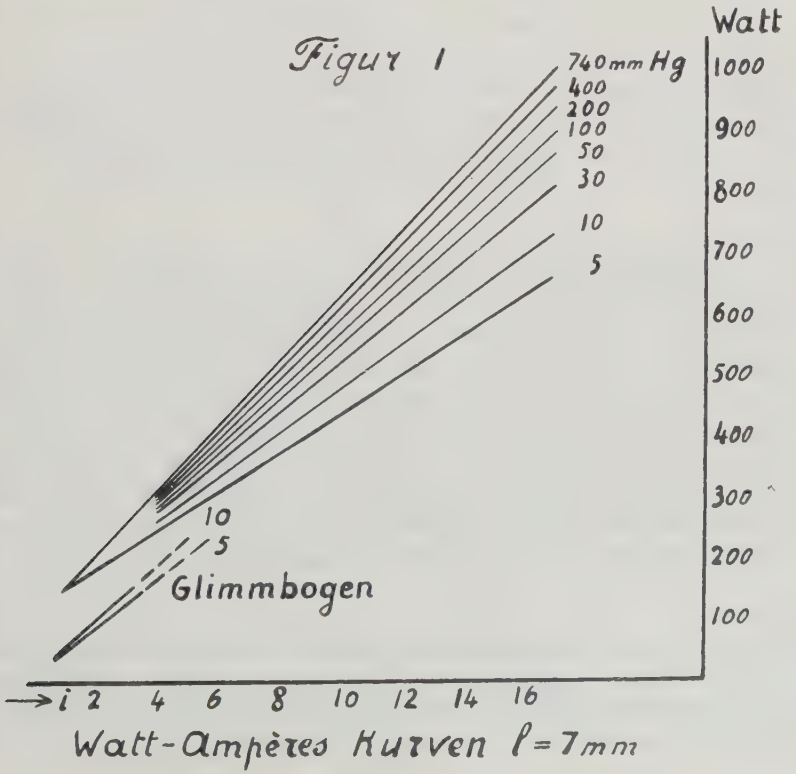
Die Aufnahme der Charakteristiken. — Bei der Aufnahme der Charakteristiken wurde im allgemeinen nach der in den Vorversuchen angegebenen Weise verfahren. Der Strombereich erstreckte sich von 3 bis 15 Amp., in einzelnen Fällen wurde die Stromstärke bis auf 0,5 Amp. herabgesetzt. Die Bogenlänge variierte von 4 bis 13 mm, und zwar wurden durchwegs die Bogenlängen von 4, 7, 10 und 13 mm ausgewählt. Der Druck wurde von 1 Atm. bis auf 5 mm Hg herabgesetzt und besonders 740, 400, 200, 100, 50, 30, 10 und 5 mm herausgegriffen. Wie schon bei den Vorversuchen erwähnt, wurde jede Charakteristik aus einer grösseren Anzahl Messungen ermittelt, indem die einzelnen Punkte durch graphische Ausgleichung zu einer Kurve zusammengefasst wurden. Die Messgenauigkeit ist naturgemäss nicht sehr gross und hängt vom Druck ab. Die grösste Messgenauigkeit wurde bei 400 mm Hg erreicht, wo die mittlere Abweichung der Einzelmessung 3—4% betrug, bei tieferem Druck erreicht sie Werte von 5—7%.

Trotz diesen relativ grossen Abweichungen ist der regelmässige Verlauf der Charakteristiken völlig gewährleistet, nirgends treten Knicke oder Verzerrungen der Kurven auf.

Form der Charakteristiken. — Beim Bogen mit Homogenkohlen unter Atmosphärendruck in Luft hat die Charakteristik bekanntlich die Form einer Hyperbel und kann in folgender Weise analytisch dargestellt werden:

$$1) \qquad V = \frac{a}{i} + b,$$

wo V die Elektrodenspannung in Volt, i die Stromstärke in Amp., a und b Konstanten bedeuten. Es hat sich nun bei den Messungen am normalen Bogen im untersuchten Druckbereich ergeben, dass nicht nur überall fallende Charakteristiken vorliegen, sondern dass auch die Form der Hyperbel gewahrt bleibt. (Bei Stromstärken unter 3 Amp. haben sich Abweichungen gezeigt, die die Fehlergrenze übersteigen.) Dass wirklich Hyperbeln vorliegen, wird am leichtesten durch die Transformation der Hyperbeln in Gerade anschaulich gemacht.



Durch Multiplikation mit i verwandelt sich die obige Gleichung 1) in folgende Gleichung:

1a) $$Vi = W = a + bi$$

woraus folgt, dass W als Funktion von i durch eine Gerade, die sogenannte Watt-Ampère-Kurve dargestellt wird. (Vgl. Fig. 1.) Diese Art der Darstellung, die sich durch Einfachheit auszeichnet, wurde bei der vorliegenden Untersuchung vielfach angewandt, und wo etwa vereinzelte Abweichungen zufälliger Natur auftraten, wurden diese Werte dem allgemeinen Verlauf der Geraden eingeordnet. Das Ergebnis, dass die Hyperbelform für alle Charakteristiken des normalen Bogens von Atmosphärendruck bis auf 5 mm Hg erhalten bleibt, stand nicht zum vorneherein fest, wenn man es auch nach gewissen bekannten Erscheinungen erwarten konnte. Für die folgenden Untersuchungen ist es um so bedeutungsvoller, als es eine notwendige, allerdings nicht hinreichende Bedingung für die Geltung der Ayrton'schen Gleichung darstellt.

d) Die Ayrton'sche Gleichung.

Die Charakteristiken des Homogenkohlebogens verschiedener Bogenlängen bei Atmosphärendruck sind nun nicht nur hyperbolisch, sondern sind auch innerhalb eines gewissen Bereiches der Bogenlänge untereinander durch bestimmte Beziehungen verbunden. Diese Verknüpfung lässt sich durch die Elektrodenspannung nach der Frölich'schen Gleichung in folgender Form ausdrücken:

2) $$V = a + bl$$

wobei l die Bogenlänge, a und b Konstante bedeuten.

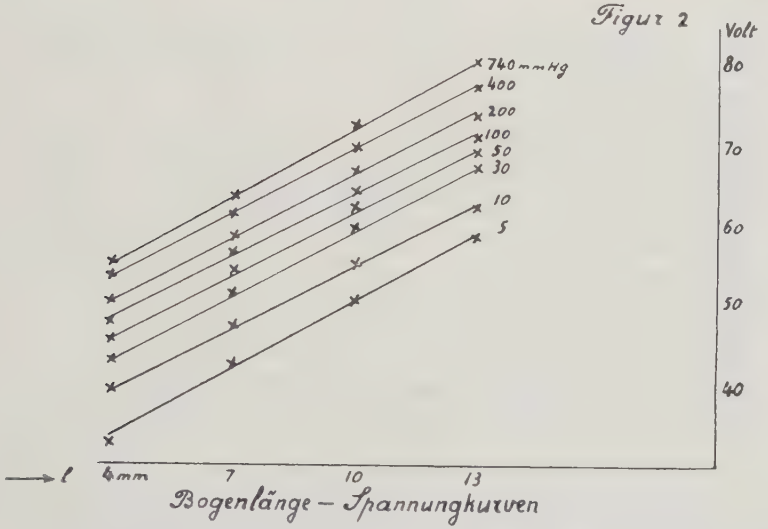
Die Untersuchung ergab im ganzen Druckbereich für die untersuchten Bogenlängen mit der Frölich'schen Gleichung befriedigende Übereinstimmung. Allerdings machte sich bei tiefem Druck eine geringe Abweichung vom linearen Verlauf bemerkbar, indem sich bei den Kurven in der üblichen Darstellungsform (Fig. 2) eine gegen die l-Achse konkave Wölbung andeutete. Es war aber in allen Fällen möglich, ohne den beobachteten Werten Gewalt anzutun, eine Näherungsgerade durch die Punkte zu legen. Somit gilt die Ayrton'sche Gleichung:

3) $$V = \alpha + \beta l + \frac{\gamma + \delta l}{i}$$

für den Homogenkohlebogen, bei Stromstärken zwischen 3 und 15 Amp. bei Bogenlängen von 4—13 mm und für jeden Druck im Bereich von 740 mm Hg bis 5 mm Hg.

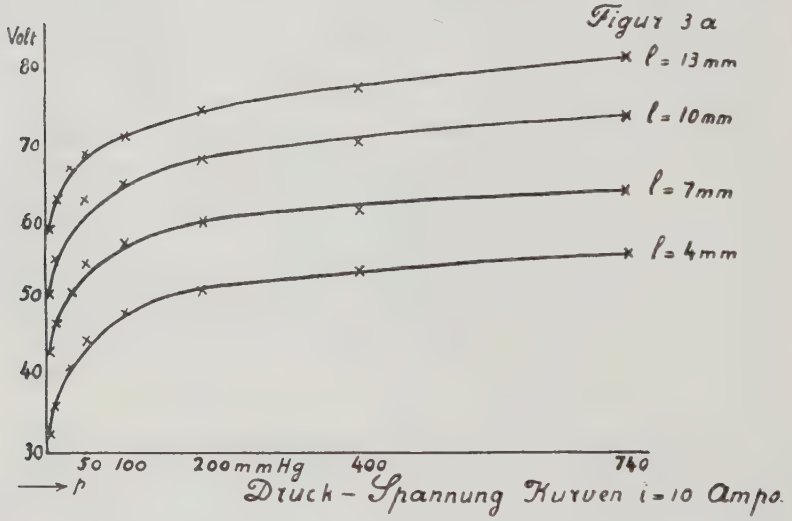
e) Die Lage der Charakteristiken bei verschiedenem Druck.

Um den Einfluss des Luftdruckes auf die Lage der Charakteristiken am besten zu übersehen, fasst man die Charakteristiken gleicher Bogenlängen zusammen und verfolgt die Lageverschiebung infolge des Druckes. Hier liegen für bestimmte Stromstärken



schon einige Messungen vor, die bei der Diskussion der Resultate näher besprochen werden sollen, und darauf hindeuten, dass mit abnehmendem Druck eine Abnahme der Elektrodenspannung eintritt und zwar nimmt diese Abnahme mit tiefem Druck progressiv zu. Wenn sich dieses Ergebnis, das nur für wenige Stromstärken untersucht ist, auf den ganzen Verlauf der Charakteristik übertragen lässt, so würde das in der üblichen Darstellung einem stetigen progressiven Tieferliegen der Charakteristiken entsprechen. In der Tat hat sich dieses mehr qualitative Ergebnis früherer Messungen in der erwarteten Weise bestätigt (vgl. Fig. 1). Bei Betrachtung der gegenseitigen Lage der Charakteristiken kann man feststellen, dass sie sich nicht einfach parallel verschieben, sondern dass sich ein Einfluss der Stromstärke und der Bogenlänge bemerkbar macht. Diese Abhängigkeiten lassen sich am besten anhand gesonderter Darstellungen erfassen, so sei zunächst dem Verlauf der Druck-Spannungs-Kurven für verschiedene Stromstärken bei konstanter Bogenlänge

unsere Beachtung geschenkt. Cet. par. sinkt bei jeder Bogenlänge und einer Stromstärke von über 3 Amp. die Elektrodenspannung und zwar wie schon bemerkt, mit abnehmendem Druck in progressiver Weise (Fig. 3 a). Das Bild dieser Kurven gemahnt



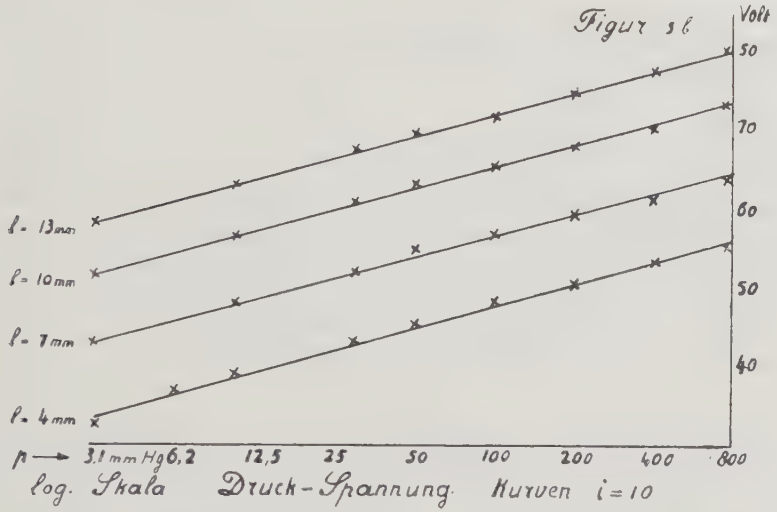
an die Exponentialfunktion; auch aus gewissen theoretischen Gründen könnte man, wenigstens für einen gewissen Druckbereich, an einen exponentiellen Verlauf denken. Die Übertragung auf eine logarithmische Skala bestätigt die Vermutung in schöner Weise: es ergibt sich eine Gerade von Form:

4) $$V = c + d \ln p$$

wo p den Druck und c und d Konstanten bedeuten (Fig. 3b). Diese exponentielle Abhängigkeit der Elektrodenspannung vom Druck hat sich nun für alle untersuchten Bogenlängen und für jede Stromstärke über 3 Amp. in befriedigender Weise bestätigt. Durch dieses Ergebnis ist nun die Schar der Charakteristiken gleicher Bogenlänge bei verschiedenem Druck zu einem analytisch erfassbaren Gebilde geworden. Gestützt auf dieses Ergebnis und auf die schon erwähnte Gültigkeit der AYRTON'schen Gleichung, kann versucht werden, eine für den gesamten untersuchten Druckbereich gültige erweiterte AYRTON'sche Gleichung aufzustellen.

f) Die erweiterte Ayrton'sche Gleichung.

Sind zur Ayrton'schen Gleichung in der ursprünglichen Form vier Konstanten notwendig (Rasch (40) hat allerdings unter Berücksichtigung der Kratertiefe als einer Korrektion der Bogenlänge eine der Ayrton'schen Gleichung analoge Formel mit drei Konstanten aufgestellt), so erfordert die Hinzufügung einer weiteren Variablen, nämlich des Druckes, doppelt so viel, also acht Konstanten.



Den Ausgangspunkt zur Aufstellung dieser Gleichung bildeten die Watt-Ampère-Geraden, indem für jede Gerade von der Form $W = a + bi$ (1 a) die Konstanten a und b bestimmt wurden. Die für eine Bogenlänge erhaltenen Werte wurden auf eine einfach logarithmische Skala ($\log. p$) für jeden beobachteten Druckwert eingetragen. Entsprechend der oben erwähnten exponentiellen Abhängigkeit befanden sich diese Punkte auf oder nahezu auf einer Geraden; bei tieferem Druck scheint sich eine systematische Abweichung anzudeuten, im ganzen aber lassen sich die Werte in befriedigender Weise durch eine Gerade darstellen. Dies Verfahren fand für jede Bogenlänge seine Anwendung, wobei für die entstandenen Geraden der Form:

$$a = c_1 + d_1 \cdot lnp$$
$$b = c_2 + d_2 \cdot lnp$$

(vgl. 4) die Konstanten c und d bestimmt und als Funktion der Bogenlänge aufgetragen wurden. Damit entstand wieder ein

System von Geraden (entsprechend der FRÖLICH'schen Gleichung) und auch die Konstanten dieser Geraden von der Form:

$$c_1 = e_1 + f_1 l$$
$$c_2 = e_2 + f_2 l$$
$$d_1 = e_3 + f_3 l$$
$$d_2 = e_4 + f_4 l$$

(vgl. 2)) wurden berechnet und damit waren die gesuchten acht Konstanten in eindeutiger Weise bestimmt. Es entstand also eine Gleichung von der Form

5) $$W = \left\{ (al + b)\, lnp + cl + d) \right\} i + (el + f)\, lnp - gl + h$$

Nach Einführung numerischer Werte und Ersatz des log. naturalis durch den Brigg'schen ergab sich folgende Gleichung:

5a) $$V = (0.4441 + 6.40)\, lgp + 0.85 \cdot 1 + 20.1 + (-1.22 \cdot 1 + 23.5)\, lgp + 18.2 \cdot 1 - 16$$

1

Die aus dieser Gleichung erhaltenen Werte für die Elektrodenspannung geben die beobachteten Grössen innerhalb enger Grenzen recht genau wieder, besonders wenn man berücksichtigt, eine wie grosse Anzahl Variabeln diese Gleichung umfasst. Während die AYRTON'sche Gleichung in der ursprünglichen Form eine einfach unendliche Zahl von Charakteristiken darstellt, nämlich diejenigen verschiedener Bogenlängen, enthält die obige Gleichung (5a) eine zweifach unendliche Schar von Charakteristiken, nämlich diejenigen verschiedener Bogenlänge und verschiedenen Druckes.

Anhand dieser Gleichung (5a) lassen sich die Versuchsergebnisse leicht übersehen, um so mehr, da man es durch geeignete Transformation immer mit Geraden zu tun hat. Durch Angabe der Schnittpunkte dieser Geraden bekommt man einen guten Begriff von deren Anordnung und Verlauf.

Aus der Möglichkeit, eine Schar von Geraden durch eine Gleichung darstellen zu können, folgt, dass diese Geraden sich in einem Punkt schneiden müssen (also auch parallel zueinander verlaufen können). Für die Druck-Spannungs-Geraden (V, *lgp*) verschiedener Stromstärke der gleichen Bogenlänge ergeben sich folgende Zahlen:

		Schnittpunkte der i-Geraden	
		Volt	lgp
$l = 4\,W = (8.28\,lgp + 23.5)\,i + 6.5\,lgp + 57$		26	—0.88
$l = 7\,W = (9.51\,lgp + 26.0)\,i - 5.9\,lgp + 111$		—1288	—150
$l = 10\,W = (10.84\,lgp + 28.6)\,i - 18.7\,lgp + 165$		123	8.8
$l = 13\,W = (2.81\,lgp + 31.2)\,i - 31.4\,lgp + 220$		116	7.0

(6)

Die Schnittpunkte verschieben sich in charakteristischer Weise, wenn man von den kleinen Bogenlängen zu den grösseren Werten fortschreitet. Während bei 4 mm Bogenlänge der Schnittpunkt auf der Seite der kleinen Spannungs- und Druckwerte liegt, springt er bei grösserer Bogenlänge (10 mm) zu sehr hoch gelegenen Werten. Zwischen diesen beiden Bogenlängen muss ein Wert liegen, wo die Geraden parallel verlaufen. Mit weiterer Steigerung der Bogenlänge rückt der Schnittpunkt allmählich gegen kleinere Werte, bleibt aber weit ausserhalb des untersuchten Druck- und Spannungsbereiches.

Wenn man die Druckspannungswerte in der Weise anordnet, dass man die Stromstärke konstant hält und die Geraden konstanter Bogenlänge verfolgt, erhält man folgende Zahlen:

		Schnittpunkte der l-Geraden	
		Volt	lgp
$i = 5\,E = (-0.4 \cdot lgp + 4.49)\,1 + 11.1 \cdot lgp + 16.9$		135	10.2
$i = 10\,E = (0.022 \cdot lgp + 2.67)\,1 + 8.75 \cdot lgp + 18.5$		—950	—110
$i = 15\,E = (0.162 \cdot lgp + 2.06)\,1 + 7.97 \cdot lgp + 19.0$		— 80	—12.4

Auch hier liegen die Schnittpunkte weit ausserhalb des beobachteten Teiles der Kurven: die Geraden verlaufen also nahezu parallel; allerdings lässt auch sich hier ein Gang herauslesen.

Ein ähnliches Bild bietet sich, wenn man zu den Bogenlängs-Spannungs-Geraden übergeht, und die Geraden konstanten Druckes betrachtet, während man die Stromstärke konstant hält. Es ergeben sich die folgenden Werte:

		Schnittpunkte der p-Geraden Volt	Bogenlänge in mm	
Aus Gleichung (7)	$i = 5$	142	28	
ergeben sich als	$i = 10$	— 83	—44	(7a)
Schnittpunkte :	$i = 15$	— 13	—20	

Die Geraden schneiden sich weit ausserhalb des beobachteten Teiles der Kurven, bei kleinen Stromstärken liegen die Schnittpunkte in der üblichen Darstellungsweise weit rechts oben, bei grösseren Stromstärken links unten, d. h. bei negativen Werten der Spannung und der Bogenlänge.

Wenn man nun bei den Bogenlängen-Spannungs-Geraden den Druck konstant hält und die Geraden verschiedener Stromstärken zum Schnitt bringt, erhält man folgendes Bild:

		Schnittpunkte der i-Geraden Volt	Länge in mm	
$p = 740\,E = 38.5 + 2.13\,l + \frac{52 + 6.0\,l}{i}$	$p = 740$	22.0	—7.6	
$p = 200\,E = 35.8 + 1.87\,l + \frac{37 + 8.4\,l}{i}$	$p = 200$	26.6	—4.5	
$p = 100\,E = 32.9 + 1.74\,l + \frac{31 + 9.7\,l}{i}$	$p = 100$	27.5	—3.1	(8)
$p = 50\,E = 31.0 + 1.60\,l + \frac{23 + 11.0\,l}{i}$	$p = 50$	27.6	—2.2	
$p = 10\,E = 26.5 + 1.30\,l + \frac{8 + 13.9\,l}{i}$	$p = 10$	25.8	—0.53	
$p = 5\,E = 24.5 + 1.17\,l + \frac{1 + 15.3}{i}$	$p = 5$	24.4	—0.05	

Der Schnittpunkt, der bei Atmosphärendruck weit links bei negativen Bogenlängen liegt, rückt mit abnehmendem Druck gegen rechts und erreicht bei 5 mm Hg fast die Bogenlänge 0. Die Höhe des Schnittpunktes über der l-Achse nimmt bis etwa 50 mm zu, um von da mit abnehmendem Druck sich zu verringern.

Bei den Watt-Ampère-Kurven sei zunächst der Druck konstant gehalten und die Geraden konstanter Bogenlänge unter sich zum Schnitt gebracht. Es ergeben sich folgende Schnittpunkte:

		Schnittpunkte der p-Geraden Amp.	Watt	
	$l = 4$	—0.8	42	
Aus Gleichung (6)	$l = 7$	0.6	125	(6a)
ergeben sich die	$l = 10$	1.8	220	
Schnittpunkte :	$l = 13$	2.6	306	

Der Schnittpunkt dieser Geraden rückt mit wachsender Bogenlänge stetig gegen rechts, so dass z. B. bei 13 mm Bogenlänge und 2,6 Amp. sich ein Einfluss des Druckes nicht mehr bemerkbar macht; bei kleineren Stromstärken sollte sich mit abnehmendem Druck die Spannung steigern. Da die Messungen bei kleinen Stromstärken wegen der Instabilität des Bogens („Klettern") und auch wegen des Auftretens neuer Bogenformen grosse Schwierigkeiten bieten, konnte nicht festgestellt werden, ob sich dieses formal abgeleitete Ergebnis wirklich beobachten lässt.

Wenn man nun zum Schluss dieser formal-systematischen Zusammenstellung die Schnittpunkte der Watt-Ampère-Kurven bei konstantem Druck und festgehaltener Bogenlänge betrachtet, ergeben sich folgende Werte:

		Schnittpunkte der l-Geraden Amps.	Watt	
	$p = 740$	— 2.85	— 60	
Aus Gleichung (8)	$p = 200$	— 4.5	—122	
ergeben sich als	$p = 100$	— 5.7	—157	(8a)
Schnittpunkte :	$p = 50$	— 6.9	—192	
	$p = 10$	—10.8	—280	
	$p = 5$	—13.2	—325	

Mit abnehmendem Druck rückt der Schnittpunkt gegen immer kleinere Werte der Stromstärke und der Leistung, d. h. es besteht die Neigung, dass sich das Strahlenbündel der Watt-Ampère-Kurven bei tiefem Druck einer Schar paralleler Geraden annähert.

Zusammenfassend kann man aus der Verschiebung der Schnittpunkte folgende Schlüsse ziehen, wenn man über die beobachteten Werte beidseitig extrapoliert:

1. Bei sehr kleinen Stromstärken und sehr langen Bogen ist der Druckeinfluss gering;

2. Bei sehr tiefem Druck scheint es einen Punkt zu geben, wo bei kleiner Bogenlänge die Elektrodenspannung von der Stromstärke nahezu unabhängig wird.

3. Der Einfluss der Bogenlänge auf die Elektrodenspannung ist bei sehr tiefem Druck und grosser Stromstärke gering.

Zum Schluss dieser Zusammenstellung über eine erweiterte Ayrton'sche Gleichung sei noch auf einige mögliche systematische Abweichungen hingewiesen. Die Watt-Ampère-Kurven zeigen im ganzen untersuchten Druckbereich auch nicht die geringste Abweichung, die man als systematisch deuten könnte. Dadurch hebt sich die Hyperbelform als ein wesentliches Merkmal der Charakteristik hervor. In einer kürzlich veröffentlichten Arbeit über den Dochtkohlebogen weisen Wehrli und Baumann (41) auch auf die Hyperbel als Grundform der Bogencharakteristik hin, und belegen ihre Ansicht durch Versuchsergebnisse.

Während die Frölich'sche Gleichung bei Atmosphärendruck innerhalb der untersuchten Bogenlängen genau stimmt, machen sich mit abnehmendem Druck Abweichungen bemerkbar, die systematischen Charakters zu sein scheinen. Die Frölich'sche Gerade geht in eine gegen die l-Achse konkave Kurve über; die Krümmung ist nicht beträchtlich, scheint aber reell zu sein. Übrigens kann man auch bei Atmosphärendruck eine solche Krümmung beobachten, wenn man zu kleinen Bogenlängen übergeht. Wahrscheinlich ist der überwiegende Einfluss des Elektrodenmaterials über denjenigen des umgebenden Gases in beiden Fällen von Bedeutung.

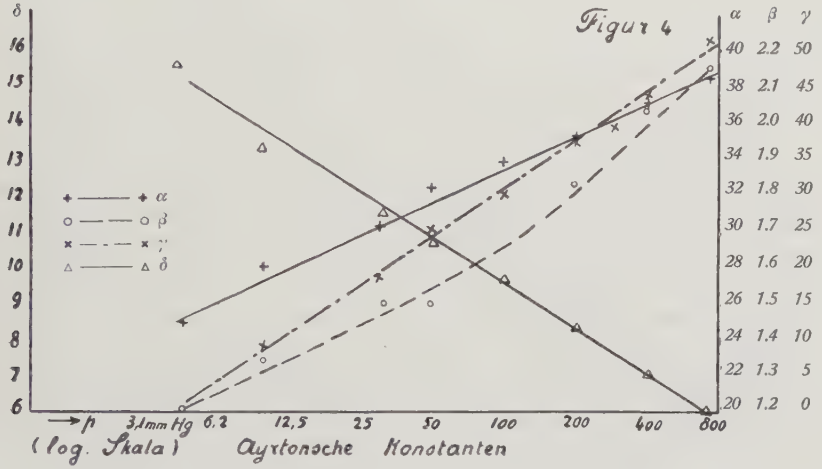
Die 3. Beziehung, die eine Funktion zwischen der Elektrodenspannung und dem Druck aufstellt, stimmt in groben Zügen, aber auch hier deutet sich eine systematische Abweichung an. Die Druck-Spannungsgerade (in logarithmischer Skala) scheint gegen die log. p-Achse etwas konkav gekrümmt zu sein. Das würde bedeuten, dass der Abfall der Elektrodenspannung mit dem Druck stärker als exponentiell sei.

Alle diese Abweichungen, die Beträge von etwa $4\,^0/_0$ erreichen, vermögen die Bedeutung der erweiterten Ayrton'schen Gleichung nicht zu beeinträchtigen, doch dürften sie Andeutungen geben, was für Abweichungen vom Verlaufe der Geraden ausserhalb des untersuchten Bereiches auftreten könnten.

g) Einzelteile des Bogens.

Durch die Gültigkeit der Ayrton'schen Gleichung sind wir in die Lage versetzt, an Hand bekannter Beziehungen zwischen den Ayrton'schen Konstanten und dem Anoden-, Kathodenfall und den Gradienten der Gassäule diese Grössen zu berechnen. Die folgenden Werte sind aus den ursprünglichen Beobachtungen

für jeden Druck berechnet. (Die aus der erweiterten Ayrton'schen Gleichung abgeleiteten Konstanten zeigen kleine Abweichungen.) Die Bedeutung der Konstanten ergibt sich aus der Gleichung (3) (p. 34) (vgl. Figur 4).



p	α	β	γ	δ
740	38.5	2.15	54	6.1
400	36.6	2.03	44	7.1
200	35.6	1.84	38	8.3
100	33.7	1.65	30	9.9
50	32.3	1.51	26	10.8
30	29.7	1.50	19	11.6
10	27.0	1.35	9	13.4
5	23.7	1.20	0	15.7

Die Konstanten α, β und γ nehmen mit abnehmendem Druck gleichmässig ab, während die Konstante δ zunimmt. Die Abnahme resp. Zunahme gehorcht in grossen Zügen dem expontiellen Gesetz, die Abweichungen scheinen zufälligen Charakters, vielleicht ist allerdings die schwache konkave Krümmung der α-Kurve gegen die log. p-Achse reell. Bei den β-Werten ist die Unregelmässigkeit zwischen 200 und 25 mm Hg auffällig, ob sie reell ist, lässt sich an Hand des vorliegenden Materials nicht entscheiden, an sich ist eher ein geradliniger Verlauf anzunehmen. Bei den γ und δ-Werten- sind die Abweichungen mit ziemlicher Sicherheit auf Zufälligkeiten in den Messungen zurückzuführen.

Die physikalische Bedeutung der Konstanten ist schon von Mrs. Ayrton erkannt und untersucht worden: α und γ gehören

den Anoden- und Kathodenfall an, β und δ bestimmen das Gefälle in der Gassäule. Durch Sondenmessungen von Ayrton und Grotrian wurden die folgenden Beziehungen aufgestellt:

$$V_A = \frac{4\,a}{5} + \frac{\gamma}{i} \qquad V_A \text{ Anodenfall}$$

$$V_K = \frac{a}{5}\ ^{1}) \qquad V_K \text{ Kathodenfall}$$

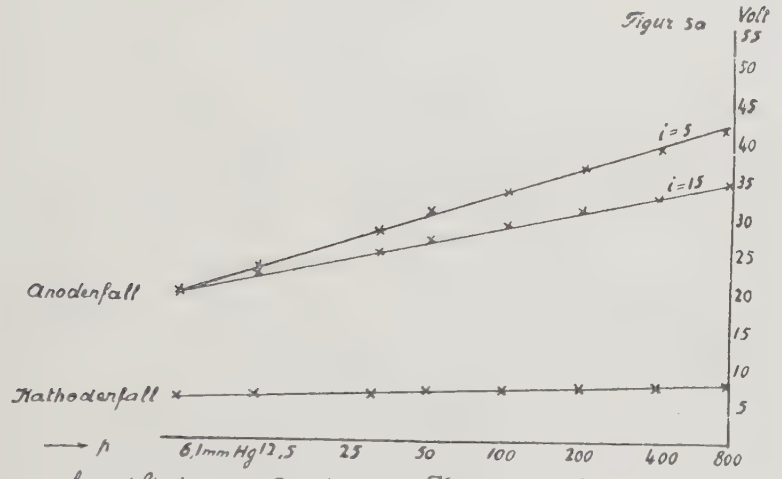
$$F = \beta + \frac{\delta}{i} \qquad F \text{ Gradient in der Gassäule}$$

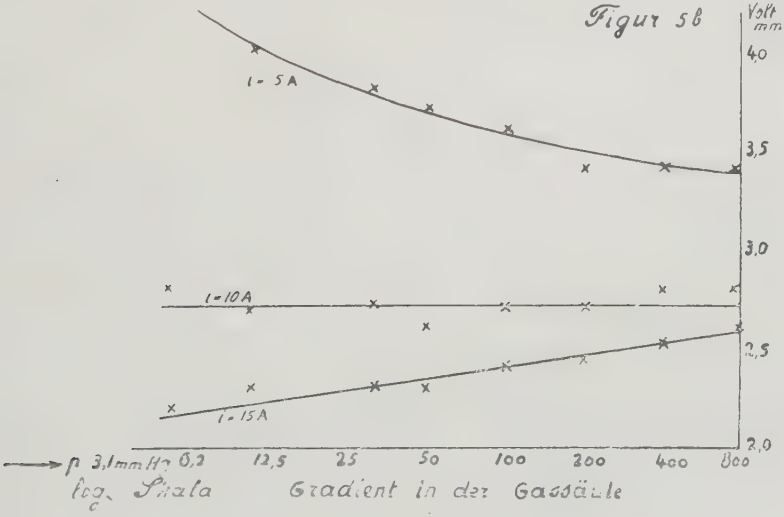
Diesen Gleichungen, die für bestimmte Versuchsbedingungen errechnet wurden, mag eine allgemeine Bedeutung zukommen, so dass man es wohl wagen darf, diese Formeln auf den Bogen unter vermindertem Druck anzuwenden. Da, wie schon oben (p. 28) kurz erwähnt, neuerdings wieder auf systematische Fehlerquellen der üblichen Sondenmessungen aufmerksam gemacht wurde, empfiehlt es sich nicht, langwierige Sondenmessungen auszuführen, da die zwischen den Ayrton'schen Konstanten und Anoden-, Kathodenfall und Gradient in der Gassäule bestehenden Beziehungen (die allerdings auch auf Sondenmessungen beruhen) auf einfache Weise einen ungefähren Überblick gestatten. Langmuir hat, wie mir nur durch ein Referat von Günther-Schulze (42) bekannt ist, darauf hingewiesen, dass die Sondenmessungen nur dann einwandfreie Resultate liefern, wenn die Elektronengeschwindigkeiten an dem betreffenden Ort zu vernachlässigen sind; die Sonden werden nämlich auf ein Potential aufgeladen, das nahezu der Voltgeschwindigkeit der Elektronen entspricht. Gerade bei Messungen im Anoden- und Kathodenfall scheint die erwähnte Bedingung nicht erfüllt. Aus den dargelegten Gründen wird wohl ersichtlich, dass die üblichen Sondenmessungen kaum grössere Genauigkeit zu bieten vermögen, als die allgemeinen Beziehungen der Ayrton'schen Konstanten es tun können.

Da Anoden-, Kathodenfall und Gradient in der Gassäule lineare Beziehungen der Ayrton'schen Konstanten darstellen und die letzteren lineare Funktionen von log. p sind, so müssen auch V_K, H_A und F in Abhängigkeit von log. p einen linearen Verlauf zeigen. Wie Fig. 4 zeigt, ist dies auch in guter Annäherung der Fall. Die Abweichungen von der Geraden rühren von den erwähnten Unregelmässigkeiten der Ayrton'schen Konstanten her (vgl. p. 39). Der Anodenfall nimmt mit sinkendem Druck stark, der Kathodenfall schwach ab; der Gradient der Gassäule ist bei einer Stromstärke von 10 Amp. vom Druck unabhängig,

[1]) Bei kleinen Stromstärken kommt noch $f\left(\frac{\gamma}{i}\right)$ hinzu

bei 5 Amp. nimmt er mit abnehmendem Druck etwas zu, bei 15 Amp. verringert er sich ein wenig (vgl. Figur 5).





2. *Andere Entladungsformen.*

Allgemeines.

Sind die Verhältnisse beim normalen Bogen relativ übersichtlich und ist die gesetzmässige Abhängigkeit vom Druck relativ leicht festzustellen, so ist dies bei den andern Entladungs-

formen keineswegs der Fall. Die beim Kohlebogen unter vermindertem Druck auftretenden Formen sind von einer verwirrenden Mannigfaltigkeit und eine systematische Einordnung stösst auf beinahe unüberwindliche Schwierigkeiten (vgl. z. B. (37) p. 22). Viele Erscheinungen waren nicht reproduzierbar; die Entstehungsbedingungen konnten nicht genau festlegt werden, und auch die Beobachtungen der Erscheinungen selbst sind recht lückenhaft, da eine Form ohne ersichtlichen Grund oft in eine andere übergeht. Nicht allein die sprunghafte Änderung der Formen bereitet Schwierigkeiten, sondern gelegentlich auch ein langsames, stetiges Übergehen einer Form in eine andere, so dass die Unterscheidung der Formen unsicher wird. Sind bei den Metallbogen durch die Untersuchungen von Hagenbach (27) und seiner Mitarbeiter die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Formen und den dazu gehörigen elektrischen Verhältnissen eindeutig klargelegt, so ist dies für den Kohlebogen nicht gelungen. Um auch hier zu eindeutigen Ergebnissen zu gelangen, müssten wohl die Versuchsbedingungen modifiziert werden: der Bogen müsste, statt in Luft, in Edelgasen untersucht werden, und die Netzspannung müsste zur Erhöhung der Stabilität auf mehrere Tausend Volt gesteigert werden.

Der Glimmbogen.

Der Glimmbogen unterscheidet sich vom normalen Bogen durch seinen flächenhaften Anodenansatz. Durch dieses Merkmal kann man ihn im allgemeinen vom normalen Bogen unterscheiden; das trifft besonders für den oberen Druckbereich seines Vorkommens zu, bei tieferem Druck (unter 10 mm Hg) vermag man mit der obigen Definition nicht mehr auszukommen, besonders wenn man die Stromstärke über 4 Amp. steigert; denn dann kommt man in das typische Übergangsgebiet, wo sich die Anodenansatzstelle zwar nicht mehr auf einen kleinen heissen Fleck beschränkt, aber noch nicht der typische weissglimmende, „pelzige" Überzug der Anode zeigt. Auch das Voltmeter, von dem man vielleicht eine Entscheidung erwarten könnte, versagt in diesen Fällen, indem die Spannung analog dem Aussehen sich stetig verändert. Im Bereich des typischen Glimmbogens kommen verschiedene Spielarten vor, die von der Mannigfaltigkeit der Erscheinungsformen beim Kohlebogen unter vermindertem Druck einen Begriff geben. Durch Photographien in der Dissertation von Hörburger ist das äussere Aussehen und der Formenreichtum dieser Entladungen bekannt. Die meisten dieser Formen, die Hör-

BURGER bei einem Druck von 2 bis 0.02 mm Hg beobachtet hat, lassen sich auch bei höherem Druck beobachten, wenn man die Stromstärke auf Werte unter 1 Amp. reduziert. Bemerkenswert ist, dass der Glimmbogen oft geschichtet ist; bis zu acht Schichtungen wurden beobachtet. Es ist ein sehr schönes Schauspiel, wie sich die Schichten von der Anode ablösen und gegen die Kathode wandern und wie dabei doch das Bild als Ganzes sich gleich bleibt. An Stelle der Schichten bilden sich oft kleinere Flächen, die voneinander völlig getrennt sind und nur durch ihre symmetrische Anordnung ihre Zusammengehörigkeit beweisen (vgl. (17)).

An interessanten Erscheinungen mag ein Bogen mit doppeltem Kathodenansatz erwähnt sein: von der mit der Glimmhaut überzogenen obern Anode ging eine weisslich verschwommene Strombahn zur Kathodenspitze und erzeugte einen weissglühenden Fleck; von da aus setzte die Strombahn in einem Bogen von etwa 1,5 cm an einem unteren Teil der Kathode an. Wenn diese Erscheinung auch nicht reproduzierbar war, so ist sie doch mehrmals aufgetreten und somit sicher gestellt. Öfters ist es auch vorgekommen, dass sich Entladungen zwischen den Elektroden und dem unter Spannung stehenden gusseisernen Kessel ausbildeten, während zugleich der Glimmbogen zwischen den beiden Kohlen brannte. Gelegentlich löste sich die anodische Glimmhaut in eine grosse Anzahl gelbleuchtender, raschbewegter Punkte oder kleiner Kügelchen auf.

Als eine Modifikation dieser Form ist der „sprühende" Glimmbogen anzusehen, wo kleine glühende Teilchen, die von der Kathode zu kommen schienen, an der Anode reflektiert und weggeschleudert wurden und so Anlass zu einem abwechslungsreichen Feuerwerk boten.

Wurde die Stromstärke auf Werte unter 0,3 Amp. herabgesetzt und der Druck auf 5 mm Hg erniedrigt, so ging der Glimmbogen in Glimmlicht über, wobei natürlich die Elektrodenspannung auf Werte von mehreren hundert Volt hinaufschnellte. Interessant war das Hin- und Herpendeln zwischen Glimmlicht und Bogen zu beobachten, das oft ohne jeden äusseren sichtbaren Anstoss einsetzte.

Entstehungsbedingungen und elektrische Verhältnisse.

Den Übergang vom normalen Bogen zum Glimmbogen begünstigen im allgemeinen ein Herabsetzen des Druckes, eine Verminderung der Stromstärke und in gewissen Fällen eine Ver-

grösserung der Bogenlänge. Um die Erscheinungen des Glimmbogens beobachten zu können, wurde die Stromstärke für einzelne Untersuchungen bis auf 0,5 Amp. vermindert. Unter diesen Umständen erhielt ich schon bei 50 mm Hg einen deutlichen Glimmbogen; wollte man bei einer Stromstärke von etwa 3 Amp. einen solchen erzeugen, so musste der Kessel bis mindestens 12 mm Hg evakuiert werden. Sobald der Glimmbogen auftrat, konnte sich auch der geschichtete Bogen bilden; es scheint mir übrigens nicht ausgeschlossen, dass auch ein normaler Bogen in bestimmten Fällen geschichtet sein kann. Messungen konnten am geschichteten Bogen leider nicht ausgeführt werden; so häufig die Erscheinung auftrat so war sie doch sehr instabil und dauerte unverändert meistens nur kurze Zeit. Da bei geringer Stromstärke mit der zur Verfügung stehenden Netzspannung von 410 V der Bogen äusserst unruhig und die Messgenauigkeit wegen der Steilheit der Charakteristik in diesem Gebiet gering war, konnten Messungen nur bei grösseren Stromstärken (über 1,5 Amp.) und tiefem Druck (unter 10 mm Hg) ausgeführt werden. Dass die Bogenlänge wegen Abreissen und Verlöschen des Bogens auf Werte unterhalb 10 mm beschränkt werden musste, war von vornherein zu erwarten.

Es lässt sich wohl verstehen, dass es unter diesen Umständen sehr schwierig war, auch nur einigermassen genaue Messresultate zu erhalten. Man muss sich vergegenwärtigen, dass von einer Stabilität keine Rede sein kann, und dass man immer den Moment der richtigen Bogenlänge abwarten muss, um mit einem Blick Volt- und Ampèremeter abzulesen. Die Messungen mussten oft von zwei Beobachtern zusammen ausgeführt werden, wobei der eine das Aussehen des Bogens, und das Eintreffen der richtigen Bogenlänge angab, während der andere Volt- und Ampèremeter möglichst gleichzeitig ablas. Eine auf diese Weise durchgeführte Messung kann keine sehr genauen Resultate geben, besonders wenn man sich überlegt, dass durch ein neues Ansetzen des Bogens die Verhältnisse geändert werden können, hat doch die neue Ansatzstelle wahrscheinlich zunächst eine andere Temperatur und Ausdehnung und damit auch eine andere Elektrodenspannung. Immerhin gelang es, mehrere Charakteristiken aufzunehmen, wobei es sich zeigte, dass auch hier die Hyperbelform erhalten bleibt, also die Watt-Ampèrekurven Gerade sind (Fig. 1). Es konnte auch nachgewiesen werden, dass mit einer Vergrösserung der Bogenlänge eine Erhöhung der Spannung eintritt, aber die Ergebnisse genügen nicht zur Entscheidung, ob auch die Frölich'sche Gleichung stimmt. In bezug auf die Druckabhängigkeit ergab sich qualitativ dasselbe Ergebnis wie beim normalen Bogen:

Erniedrigung der Spannung mit abnehmendem Druck. Die Messungen erlauben leider nicht, auch für den Glimmbogen die Ayrton'schen Konstanten zu berechnen und damit Schlüsse auf Anoden- und Kathodenfall zu ziehen. Wie aus der Figur 1 zu ersehen ist, liegen die Watt-Ampèregeraden für den Glimmbogen unterhalb derjenigen für den normalen Bogen, allerdings sind sie etwas steiler, so dass sie auf Stromstärken von 15 Amp. extrapoliert die Geraden des normalen Bogens schneiden würden. Beim Cu-Bogen wurde von Hagenbach und Veillon für den Glimmbogen eine höhere Spannung als für den normalen Bogen gefunden, so dass dieses Resultat etwas verwundert. Möglicherweise spielt die Abkühlung der Anode beim Glimmbogen eine Rolle (Kathodenfall und Gradient in der Gassäule werden durch den Übergang vom normalen Bogen in den Glimmbogen kaum geändert), dann dürfte man eine Erniedrigung der Spannung erwarten.

Beobachtungen der Zwischenformen.

Während der Glimmbogen auch beim Kohlebogen sich in gewissen Fällen deutlich vom normalen Bogen abhebt, kann dies von der Zwischenform, wie es übrigens der Name schon andeutet, nicht gesagt werden. Die Zwischenformen unterscheiden sich vom normalen Bogen nicht durch wohldefinierte Eigenschaften, und es ist recht willkürlich, ob man von der „Zwischenform" oder nur von einer durch Zufälligkeiten bedingten Modifikation des normalen Bogens reden soll. In der Hauptsache unterscheidet sich die Zwischenform vom normalen Bogen durch andere Farbnuancen an der Anode und in vereinzelten Fällen durch eine etwas andere Form des Anodenansatzes. Das erstgenannte Kennzeichen ist aber vor allem vom umgebenden Gas abhängig und es mögen kleine Beimengungen eines Gases, z. B. H_2, wasserdampfhaltige Luft, vielleicht auch CO_2 eine solche Form vortäuschen. In der Tat wurden bei den Versuchen in einer mit Wasserdampf gesättigten Atmosphäre mehrere Formen beobachtet, die nie auftraten, wenn der Bogen in getrockneter Luft brannte. Auch vereinzelte Versuche in Leuchtgas und in Stickstoff zeigten wieder andere Formen. Wie beim Glimmbogen gilt auch hier, dass der Übergang vom normalen Bogen zu Zwischenformen stetig erfolgen kann.

Im Verlaufe der Untersuchungen wurden viele Zwischenformen beobachtet, manche davon nur ein einziges Mal. Da für diese wahrscheinlich zufällige Bedingungen verantwortlich sind,

scheint es zweckmässiger, sich auf die einzige mehrmals sicher beobachtete Form zu beschränken. Bei etwa 150 mm Hg trat an der Anode ein intensiv leuchtender blauer Fleck auf, zugleich mit einer grünlichen Aureole, während der normale Bogen keine deutlich ausgeprägte Aureole aufwies, und die Strombahn violett leuchtend war. Interessanterweise trat grüne Färbung mit dem blauen Anodenfleck vorzugsweise bei kurzen Bogenlängen auf; die Stromstärke schien nicht von wesentlichem Einfluss. Diese Form war deutlich ausgebildet und der Übergang in den normalen Bogen und umgekehrt war diskontinuierlich. Es war dies die einzige Form, bei der es gelang eine Charakteristik aufzunehmen, allerdings nur bei einer Bogenlänge von 7 mm. Die Charakteristik der Zwischenform lag etwa 5 Volt unter derjenigen des normalen Bogens und war hyperbelförmig.

III. Diskussion der Untersuchungsergebnisse.

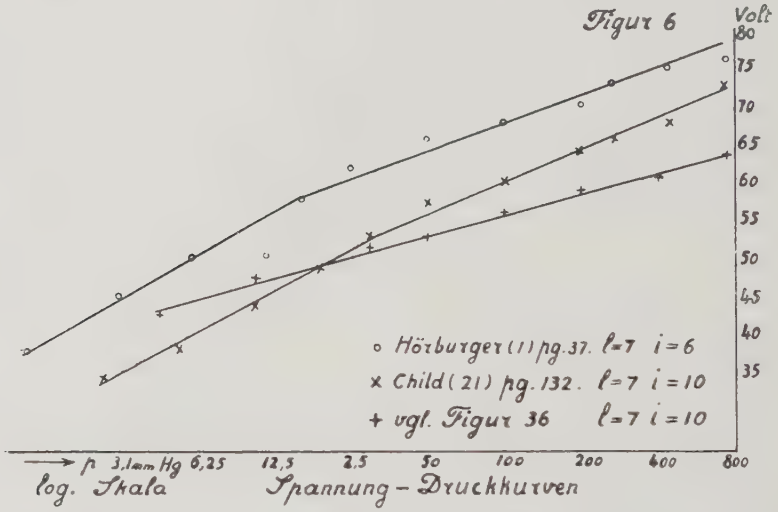
Obschon der Bogen in zahlreichen Arbeiten von allen möglichen Seiten untersucht wurde, ist es doch nicht geglückt, eine allgemein anerkannte Theorie aufzustellen. Man ist sich sogar nicht einmal im klaren, ob gewisse Vorgänge von grundlegender Bedeutung oder nur sekundärer Natur sind. Während bis vor kurzem die heisse Kathode als eine conditio sine qua non für den Bogen galt, haben neue Experimente, besonders von H. Stolt (44) diese Auffassung wieder etwas in Frage gestellt (vgl. Seeliger (37) p. 40, Slepian (45) u. a.). Von grundlegender und charakteristischer Bedeutung für den Bogen ist der Kathodenfall (negative Raumladung direkt vor der Kathode), er ist sicher ein konstituierendes Element der Bogenentladung. Alle neuen Bogentheorien gehen deshalb von dieser Tatsache aus und versuchen daraus die übrigen bekannten Erscheinungen des Bogens zu erklären. Besonders bei einer qualitativen Erfassung der Vorgänge, wie dies z. B. Grotrian (30), Compton (46), Günther-Schulze (47) u. a. versuchen, muss immer der Kathodenfall als eine bestimmende Grösse eingeführt werden. Die eigentlichen Schwierigkeiten treten erst auf, wenn man den Bogen aus den Eigenschaften der Atome und Elektronen verstehen will, also beim Studium des „Feinmechanismus" des Bogens. Die gegenwärtig bekannten Tatsachen lassen in der Tat recht verschiedene Deutungen zu, je nachdem man dem Aufprall der Ionen (Bräuer) (48), dem glühelektrischen Effekt (Compton) (46), der thermischen Ionisation (Slepian) (45), chemischen Prozessen (Stark (49), Child (22) p. 375) oder gar photoelektrischen Vorgängen oder einer

Resonanzstrahlung (Günther-Schulze) (47) eine ausschlaggebende Rolle zuerteilt.

Wir müssen es uns versagen, auf diese interessanten Fragen näher einzutreten, da dies über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinausgehen würde. Versuche, die zu einer Klärung führen könnten, müssten alle nebensächlichen Prozesse, besonders chemischer Natur, ausschalten und mit Materialien, deren Eigenschaften schon durch andere Versuche aufs genaueste bekannt sind, durchgeführt werden. Wahrscheinlich würde auch das Verhalten bei vermindertem Druck wertvolle Hinweise geben, wenn der Bogen von allen Seiten, elektrisch, spektroskopisch, thermisch und, so weit nötig, chemisch untersucht wird, denn es wird immer gewagt sein, aus den Messungen eines dieser Teilgebiete zwingende Schlüsse ziehen zu wollen. Immerhin mag es interessant sein, die vorliegenden Resultate mit Ergebnissen einzelner früherer Messungen zu vergleichen und so gewisse Beobachtungen sicherzustellen oder zu berichtigen.

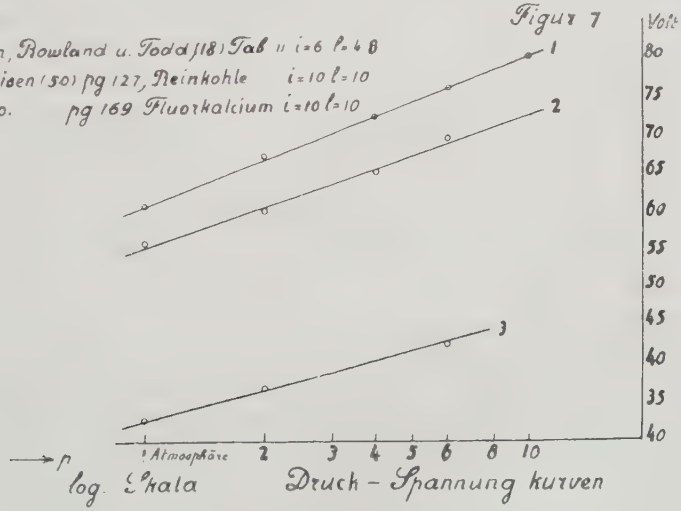
Die Gesamtspannung. Dass der absolute Betrag der Elektrodenspannung bei verschiedenen Autoren oft beträchtliche Verschiedenheiten aufweist, braucht nicht zu verwundern, da geringe Veränderungen der Versuchsbedingungen, vor allem des Elektrodenmaterials (Kohlensorte) diese Abweichungen völlig erklären können. Es handelt sich also nur darum, den Verlauf der Elektrodenspannung in Abhängigkeit bekannter Variablen zu verfolgen. Da, abgesehen von einigen mehr vorläufigen Messungen von Kohn und Guckel (33), die Elektrodenspannung als Funktion der Stromstärke (Charakteristiken) beim Kohlebogen unter vermindertem Druck nicht untersucht wurde, kommt hauptsächlich die Abhängigkeit der Spannung vom Gasdruck in Betracht. Die ersten systematischen Messungen, die von Hörburger (1) ausgeführt wurden, lassen sich leicht mit den vorliegenden vergleichen, wenn man die Werte für 6 Amp. (alle Messungen Hörburgers beziehen sich auf diese Stromstärke) herausgreift. Trägt man die Werte der Elektrodenspannung als Funktion des Logarithmus des Druckes auf (vgl. Figur 6), so zeigt sich die bekannte Abnahme der Spannung mit abnehmendem Druck. Allerdings ist der Verlauf nicht geradlinig, die Kurve zeigt vielmehr eine gegen die Druckaxe konkave Krümmung, die bei kleinen Bogenlängen deutlicher wird. Der regelmässige Verlauf spricht gegen das Vorhandensein von Messfehlern, vielleicht mag die andere Messanordnung (Glasgefäss, andere Wärmebedingungen als im gusseisernen Kessel) und Messmethode (konstante Stromstärke, Variation des Druckes) von

Einfluss sein, möglicherweise können auch Spuren von Feuchtigkeit die Messungen gefälscht haben (vgl. p. 25). Im grossen und ganzen aber werden durch die vorliegenden Messungen Hörburgers Werte bestätigt: die Elektrodenspannung nimmt mit abnehmendem Druck ab. Es zeigt sich nirgends eine Tendenz



zu einem Anstieg, wie er bei Metallbogen von Hagenbach und Veillon (26), p. 88 und von Fabry und Buisson (25) gefunden wurde. In einer Arbeit von Duncan, Rowland und Todd (18) ist allerdings auch beim Kohlebogen (für Bogenlänge über 3 mm) ein Anstieg der Spannung mit sinkendem Druck nachgewiesen. Die grosse Abhängigkeit des Spannungsverlaufes von der Bogenlänge deutet daraufhin, dass die Einwirkung wasserdampfhaltiger Luft die Messungen gefälscht hat (vgl. p. 17). Child (21) untersuchte den Kohlebogen unter vermindertem Druck und führte neben Sondenmessungen auch Messungen der Gesamtspannung aus. Die Werte, die sich auf eine Bogenlänge von 7 mm und eine Stromstärke von 10 Amp. beziehen, stimmen mit denjenigen von Hörburger überein, zeigen aber die systematischen Abweichungen vom linearen Verlauf in logarithmischer Skala nicht so deutlich, sie scheinen mehr zufälligen Charakter zu tragen (vgl. (21), p. 123). Bei den Messungen an Graphitelektroden in Wasserstoff (Child (22), p. 373) scheinen ganz andere Verhältnisse vorzuliegen, die grösste Abnahme der Spannung tritt schon bei geringer Druckverminderung zwischen 740 und 400 mm Hg auf, dann wird die Abnahme langsamer, um sich unterhalb 5 mm

Hg nochmals zu vergrössern. Die wenigen, nur vorläufig durchgeführten Messungen von Kohn und Guckel (33), p. 331, stimmen in groben Zügen mit meinen Ergebnissen überein; es sind einige Abweichungen vorhanden, die denjenigen von Hörburger entgegengesetzt sind (konvexe Krümmung gegen die log. p-Axe). Soweit sich also aus früheren Messungen Schlüsse ziehen lassen, bestätigen diese im grossen und ganzen die gefundene Druckabhängigkeit der Spannung. An sich ist auch eher zu erwarten, dass mit abnehmendem Druck eine stetige Abnahme der Spannung eintritt, es ist nicht recht einzusehen, warum bei einem bestimmten Druck (und sei es auch der „kritische Druck", vgl. Monasch (19)) ein Anstieg erfolgen sollte. Der Grund, warum die Spannung gerade mit dem Log. des Druckes abnimmt, kann nur durch detaillierte Untersuchungen festgestellt werden. Interessant ist in dieser Hinsicht, dass nach den Untersuchungen von Duncan, Rowland und Todd (18) die Elektrodenspannung im Druckbereich von 1 bis 10 Atmosphären denselben exponentiellen Verlauf zeigt, wie im partiellen Vakuum. (Werte von Tabelle II in log. Skala aufgetragen.) Auch aus den Werten von Mathiesen (50), p. 127 am Kohlebogen (Anode: Dochtkohle, Kathode: Homogenkohle Siemens) unter Druck (1 bis 6 Atmosphären) ergibt sich dasselbe Resultat, ebenso am Fluorkalziumbogen (vgl. Figur 7). Bemerkenswerterweise tritt diese logarithmische Abnahme auch bei



Messungen mit kleinen Stromstärken von Arons (20), p. 708, zutage, besonders gut scheint die Beziehung am Zn-Bogen erfüllt

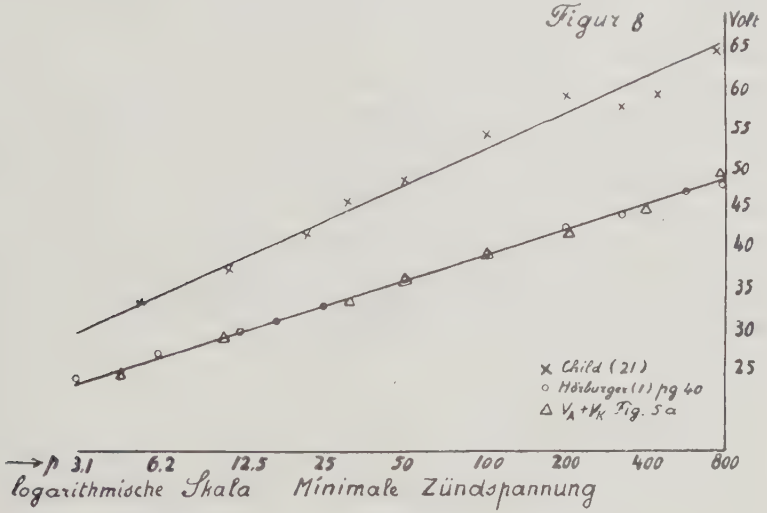
zu sein. Dies alles scheint darauf hinzudeuten, dass der logarithmischen Abnahme der Spannung mit sinkendem Druck vielleicht eine allgemeinere Beziehung zukommt, als sich nach den Messungen an Homogenkohlen unter vermindertem Druck vermuten lässt.

Die angenäherte Gültigkeit der Frölich'schen Beziehung hat Hörburger bis 0.1 mm Hg nachgewiesen (vgl. (1), p. 39), die Abweichungen scheinen zufälliger Natur zu sein, doch besteht eine schwache Neigung zu Konvexität gegen die l-Axe (vgl. (1), Fig. auf p. 12).

Aus der Frölich'schen Gleichung $V = a + bl$ rechnet Hörburger die Konstanten a und b aus: a stellt die minimale Zündspannung des Bogens dar (Extrapolation auf Bogenlänge 0) in den Ayrton'schen Konstanten wird $a = \alpha + \frac{\gamma}{i}$. Die Übereinstimmung im Verlauf mit den Werten Hörburgers und den vorliegenden ist so gut als man unter den gegebenen Umständen überhaupt erwarten kann, interessanterweise auch nahezu im absoluten Betrag. Da die minimale Zündspannung den Wert der Elektrodenspannung für die Bogenlänge 0 bedeutet, stellt die Summe Anoden + Kathodenfall die gesuchte Minimalspannung dar. Diese Beziehung ermöglicht es, auch Childs (21) Messungen zum Vergleich beizuziehen. Im grossen und ganzen ergibt sich auch hier Übereinstimmung, die Abweichungen scheinen durch Messfehler bedingt. Aus dem Sinken der Gesamtspannung mit abnehmendem Druck folgt nach obiger Beziehung mehr oder weniger zwangsweise der gefundene Verlauf, wenn es sich nämlich bestätigt, dass die Abnahme der Elektrodenspannung im wesentlichen durch die Abnahme des Anoden- und Kathodenfalles bedingt ist.

Der Gradient in der Gassäule wird durch die Konstante b der Frölich'schen Gleichung $V = a + bl$ dargestellt und in den Ayrton'schen Konstanten ausgedrückt wird $b = \beta + \frac{\delta}{i}$. Hörburger (1), p. 40 findet für b ($i = 6$ Amp.) etwa bis 25 mm Hg keinen Einfluss des Druckes, mit weiter sinkendem Druck nimmt aber b dann stark ab und erreicht bei 0.1 mm Hg den Wert 0, während nach unseren Messungen sich eine mit dem Druck langsam ansteigende Gerade ergibt. Die absoluten Werte sind auffällig stark verschieden, besonders wenn man die gute Übereinstimmung der a-Werte berücksichtigt. In diesem Ergebnis werden sich die bei der Gesamtspannung besprochenen Einflüsse der Versuchsanordnung bemerkbar machen. Die Sondenmessungen Childs,

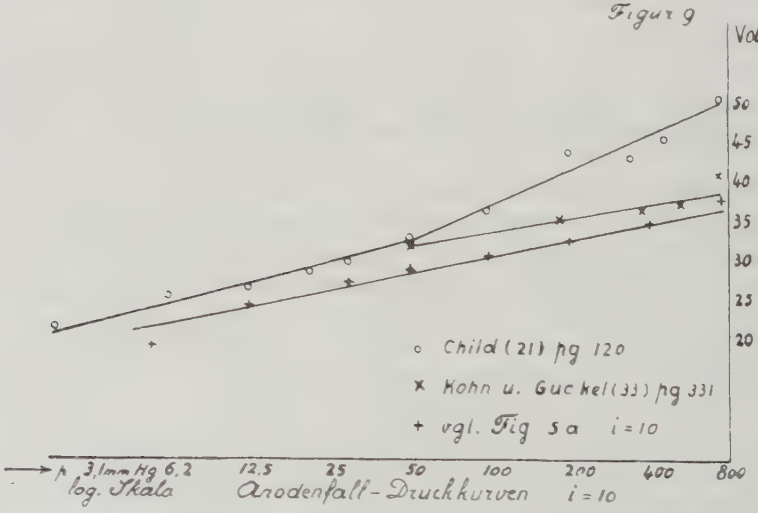
die bei einer Stromstärke von 10 Amp. ausgeführt sind, stimmen bis zu einem Druck von 100 mm Hg befriedigend mit vorliegenden überein, unterhalb 100 mm Hg zeigt sich aber bei CHILD eine Abnahme des Gradienten, während nach unseren Messungen



der Gradient bis zum tiefsten untersuchten Druck von 5 mm Hg konstant bleibt. Möglicherweise kommt hier ein Einfluss der Sonde zur Erklärung der Diskrepanz in Betracht. Wenn man aus den von KOHN und GUCKEL gemessenen AYRTON'schen Konstanten die Summe $\beta + \frac{\delta}{i}$ errechnet, so ergibt sich ein ganz abweichender unregelmässiger Verlauf, dem kaum reelle Bedeutung zuzumessen ist. Zusammenfassend kann man wohl feststellen, dass für eine Stromstärke von etwa 10 Amp. der Gradient in der Gassäule sicher bis etwa 30 mm Hg, wahrscheinlich aber bis 5 mm Hg, möglicherweise bis zu noch tieferem Druck konstant bleibt. Dies Ergebnis stimmt mit einer von GROTRIAN (30) auf Grund seiner Untersuchungen an langen Lichtbogen aufgestellten Theorie gut überein, wonach in die Formel für die elektrische Leitfähigkeit die Teilchenzahl N und die freie Weglänge l nur in dem von Druck unabhängigen Produkt Nl eingehen (vgl. (30), p. 123). Da nun die Wärmeleitfähigkeit innerhalb eines grossen Druckbereiches ebenfalls konstant ist, so muss der Gradient in der Gassäule, der von der Wärmeleitfähigkeit beeinflusst wird, innerhalb weiter Grenzen von Druck unabhängig sein. Nach dieser Theorie ist es allerdings nicht ohne weiteres einzusehen, warum diese Unabhängigkeit nur auf eine bestimmte Stromstärke beschränkt sein sollte,

wie es nach den vorliegenden Beobachtungen der Fall zu sein scheint. Wie schon erwähnt, nimmt nämlich bei kleinen Stromstärken (5 Amp.) der Gradient mit abnehmendem Druck etwas zu, bei grösserem (15 Amp.) aber ab. Ob diese Erscheinung reell ist, oder ob vielleicht die Stromabhängigkeit von $F = \beta + \frac{\gamma}{i}$ bei tieferem Druck eine andere wird, lässt sich auf Grund der vorliegenden Daten nicht entscheiden.

Messungen des Anodenfalles liegen wiederum von CHILD (22) vor, seine Sondenmessungen beziehen sich auf Kohlebogen bei 10 Amp. Im grossen und ganzen stimmen seine Ergebnisse mit den aus den AYRTON'schen Konstanten abgeleiteten Werten $V_A = \frac{4a}{5} + \frac{\gamma}{i}$ überein. Der Anodenfall sinkt mit abnehmendem Druck mehr oder weniger gleichmässig (Figur 9). Allerdings ist, in logarithmischer Skala des Druckes aufgetragen, der

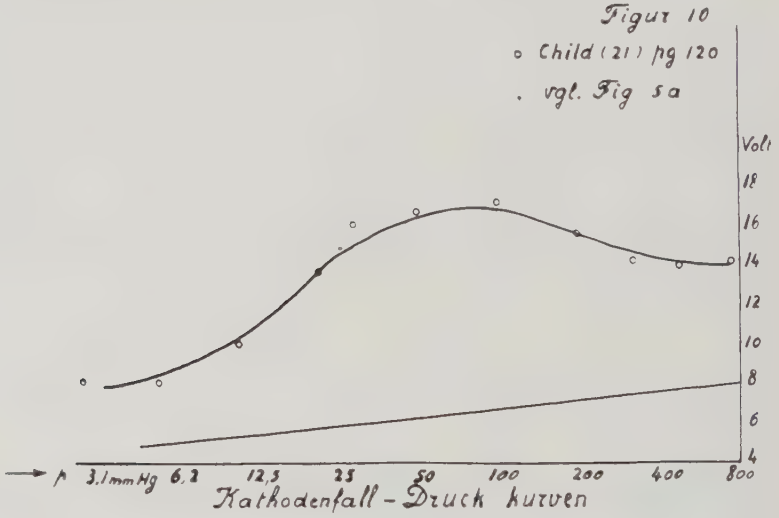


Anodenfall keine Gerade, sondern eine Kurve mit mehreren Wendepunkten. Die Abweichungen rühren wohl von Fehlern her, die bei den angewandten Sondenmessungen (Kohlesonden) kaum zu vermeiden sind. Der aus den AYRTON'schen Konstanten von KOHN und GUCKEL 33 abgeleitete Anodenfall lässt einen ähnlichen Verlauf erkennen, doch zeigt sich in logarithmischer Skala eine schwache Konvexität gegen die log. p-Axe, während sich bei unseren Messungen für alle Stromstärken eine konvexe Krümmung andeutet. Die Abweichungen sind in keinem Fall so gross, dass sie nicht als Ungenauigkeiten erklärt werden könnten, besonders

wenn man die Schwierigkeiten, die sich einer genauen Messung entgegenstellen, berücksichtigt. Somit steht wohl fest, dass der Anodenfall mit sinkendem Druck stark abnimmt und wahrscheinlich in erster Linie für die Verminderung der Gesamtspannung verantwortlich ist (vgl. (4), p. 544). Es ist bekannt, dass der Anodenfall für die Existenz des Bogens von sekundärer Bedeutung ist, und im allgemeinen keine charakteristische Konstante der Bogenentladung darstellt. In letzter Zeit sind nun aber einzelne Arbeiten erschienen (Schüler (51), Partzsch (52), vgl. Günther-Schulze (53)), die den Anodenfall aus molekularen und atomaren Eigenschaften des umgebenden Gases ableiten wollen (Ionisierungs- und Resonanzspannung u. a.), die Versuche sind aber erst für wenige Gase ausgeführt und die Deutungen stossen auf so viel Schwierigkeiten, dass diese Anschauungen keineswegs als gesichert gelten können. Gewisse Tatsachen, wie die Abhängigkeit von der Stromstärke (Ayrton, Grotrian u. a.) und wahrscheinlich auch vom Elektrodenmaterial (vgl. Günther-Schulze (53), p. 389) deuten auf wesentlich kompliziertere Verhältnisse hin. Auch die durch die Messungen bestätigte Druckabhängigkeit scheint dafür zu sprechen, dass man es an der Anode mit Einflüssen sekundärer Natur zu tun hat.

Die Sondenmessungen Childs ergeben für den Kathodenfall in Abhängigkeit vom Druck zunächst ein Ansteigen von 14 auf 17 Volt bei 100 mm Hg, darauf eine starke Abnahme bis zu 9 Volt bei Werten unter 4 mm Hg, während sich nach den vorliegenden Messungen aus der Formel $V_K = \frac{a}{5}$ eine regelmässige Abnahme von 8 auf 5 Volt ergibt. Child hat die auffällige Zunahme des Kathodenfalles sorgfältig untersucht und bei allen seinen Versuchen bestätigt und hält sie für reell. (Fig. 10.) Ein innerer physikalischer Grund für dieses Verhalten lässt sich aber nicht finden und so muss man die Erscheinung, die sonst nicht verbürgt ist, wohl als durch die Versuchsanordnung oder die Messmethode vorgetäuscht ansehen. Aus den Ayrton'schen Konstanten von Kohn und Guckel lässt sich eine regelmässige Abnahme des Kathodenfalles von 7 auf 6 Volt ableiten, bei einer Druckverminderung von 760 auf 50 mm Hg. Im Gegensatz zum Anodenfall ändert sich also der Kathodenfall im untersuchten Druckbereich nur um wenige Volt. Dies lässt sich auch nach den geltenden theoretischen Anschauungen verstehen, da der Kathodenfall als konstituierendes Element des Bogens von äusseren Einflüssen nur wenig modifiziert werden darf. Nach den meisten neueren Arbeiten ist der Kathodenfall von Bogenlänge und Strom

stärke unabhängig und wird auch vom Elektrodenmaterial (z. B. (30) Grotrian) nicht stark beeinflusst, wohl aber vom umgebenden Gas. Trotzdem der Kathodenfall, als eine bestimmende Grösse, für die Bogenvorgänge müsste konstant gefunden werden, weichen die Werte doch recht beträchtlich voneinander ab. Es wurden von verschiedenen Autoren ermittelt:



Kathodenfall des Kohlebogens bei Atmosphärendruck:

Ayrton (2), p. 225, Sondenmessungen: (je nach i)	8.3—11.0
berechnet aus $V_K = \frac{a}{5}$	7.8
Child (21), p. 120, Sondenmessungen	14.1
Grotrian (30), p. 154, berechnet aus $V_K = \frac{a}{5}$ . . .	16.0
Compton (46), p. 279	8.6
Palmén u. Wäyrynen (54), berechnet aus $V_K = \frac{a}{5}$	9.1
Mathiesen (55), p. 145/184, Sondenmessungen . .	9.4
Kohn u. Guckel (32), p. 331, berechnet aus $V_K = \frac{a}{5}$	7.1

Die meisten Werte liegen zwar um 8 Volt, aber diejenigen von Grotrian und Child weichen beträchtlich davon ab. Obschon im allgemeinen keine Abhängigkeit von der Bogenlänge bekannt ist (vgl. Ayrton (2), p. 220/238), mögen die extrem grossen Bogenlängen Grotrians etwas andere Verhältnisse abgeben. Woher die grosse Abweichung bei Childs Messungen herrührt, lässt sich nicht feststellen. Zusammenfassend kann man also mit

ziemlicher Sicherheit annehmen, dass der Kathodenfall des Kohlebogens bei Atmosphärendruck etwa 8 Volt beträgt und wahrscheinlich mit sinkendem Druck langsam abnimmt. Interessanterweise stimmt diese Zahl von 8 Volt mit der Anregungsspannung von N_2 und O_2 nahe überein, indem die beobachteten Werte für N_2 von 6.5 bis 8.4 und für O_2 von 7.8 bis 9.5 Volt variieren (55) und (56). Da bei einigen Bogen ein enger Zusammenhang zwischen dem Kathodenfall und der Anregungsspannung des umgebenden Dampfes konstatiert wurde, kommt dieser Übereinstimmung möglicherweise eine tiefere Bedeutung zu, doch müssen zur Klärung der Sachlage weitere Versuche ausgeführt werden. Sollte sich der Zusammenhang als reell erweisen, so wäre die Abnahme des Kathodenfalls mit abnehmendem Druck allerdings schwer zu deuten.

Es mag von Interesse sein, noch kurz das gegenseitige Verhalten der einzelnen Teile des Bogens in Abhängigkeit vom Druck zu betrachten. Wenn man die Gesamtspannung in Anoden-Kathodenfall und Gassäule zerlegt, so ist in Prozenten der Gesamtspannung ausgedrückt:

	p	Gassäule	VA	VK	
l 10 mm	740 mm	39	+ 50	+ 11	= 100
	100	42	+ 47	+ 11	= 100
l 10 Amp.	5	54	+ 37	+ 9	= 100

Ähnliche Werte ergeben sich aus den Ayrton'schen Konstanten von Kohn und Guckel:

		Gassäule	VA	VK	
l 10 mm	760 mm Hg	40	+ 51	+ 9	= 100
i 10 Amp.	50	42	+ 48	+ 11	= 100

Dass die Werte von Child einen anderen Verlauf zeigen, ist nach den obigen Vergleichen zu erwarten. (Die kleinen Werte für die Gassäule rühren von der Messmethode Childs her: er misst den Anoden- und Kathodenfall bei einem Abstand von 1.5 mm, so dass 3 mm der 7 mm langen Gassäule dem Potentialabfall an den Elektroden zugerechnet werden.)

		Gassäule	VA	VK	
l 7 mm	740 mm Hg	12	+ 68	+ 20	= 100
	100	13	+ 59	+ 28	= 100
i 10 Amp.	5	8	+ 70	+ 22	= 100

Aus diesen Zahlen lässt sich jedenfalls schliessen, dass der prozentuale Anteil des Kathodenfalles an der Gesamtspannung in gewissen Grenzen vom Druck unabhängig ist, ob dies auch für den Anodenfall und die Gassäule gilt, lässt sich an Hand dieser Zahlenreihen nicht entscheiden, immerhin scheint sich bei tieferem Druck der Anteil der Gassäule auf Kosten des Anodenfalles zu vergrössern. (Die Messungen Childs können aus den oben angeführten Gründen nicht massgebend sein, p. 52.)

Die durch Extrapolation gewonnenen Folgerungen (vgl. p. 41) lassen sich durch Zerlegung in Einzelheiten ganz gut verstehen. Das Anwachsen des Gradienten in der Gassäule bei kleinen Stromstärken mit zunehmendem Druck deutet darauf hin, dass bei langen Bogen, wo die Gassäule prozentual einen grossen Anteil der Gesamtspannung ausmacht, der Druckeinfluss verschwinden kann, indem die Abnahme des Anoden- und Kathodenfalles durch die Zunahme des Gefälles in der Gassäule gerade kompensiert wird.

Die zweite Folgerung, dass es bei tiefem Druck einen Punkt gebe, wo bei kleiner Bogenlänge die Elektrodenspannung von der Stromstärke unabhängig sei, kann in ähnlicher Weise gedeutet werden. Durch das Verschwinden der Konstanten γ wird der Anodenfall von der Stromstärke unabhängig und da bei kleiner Bogenlänge die Gassäule von untergeordneter Bedeutung ist, wird die Gesamtspannung nahezu unabhängig von der Stromstärke. Unter bestimmten Versuchsbedingungen ist in der Tat diese Folgerung beobachtet worden. Schüler fand in der schon erwähnten Arbeit (51) mm Hg-, Zn-, Cd- und Mg-Bogen (bei erhitzter Kathode), dass die Gesamtspannung in weiten Grenzen von der Stromstärke unabhängig ist. Auch für den Kohlebogen selbst liegt eine Bemerkung Hörburgers (1) p. 36, vor, wonach die Elektrodenspannung bei einer Veränderung der Stromstärke von 6 auf 20 Amp. konstant bleibt (Druck 0.1 mm Hg) (vgl. auch Child (22), p. 373, Graphitbogen in H_2).

Die letzte Folgerung, dass bei tiefem Druck und grossen Stromstärken der Einfluss des Druckes verschwinden soll, ist die gewagteste der drei Extrapolationen und scheint nicht ohne weiteres verständlich. Anoden- und Kathodenfall sind bei jedem Druck von der Bogenlänge unabhängig, der Gradient in der Gassäule nimmt mit grossen Stromstärken mit sinkendem Druck ab, dass er aber den Wert 0 erreicht, erscheint doch fraglich. Interessanterweise liegen zur Prüfung dieser Extrapolation Messungen von Hörburger vor, die bei einem Druck von 0.1 mm Hg eine völlige Unabhängigkeit von der Bogenlänge (1 bis 7 mm)

ergeben. Dass diese Konstanz schon bei Stromstärken von 6 Amp. auftritt, steht allerdings mit den vorliegenden Messungen im Widerspruch und hängt mit dem oben erwähnten Verhalten des Gradienten in der Gassäule zusammen (vgl. p. 50 f.)

Zusammenfassung.

1. Bei der Aufnahme von Charakteristiken des Kohlebogens in Luft unter vermindertem Druck wurde bei Konstanthaltung von Stromstärke und Bogenlänge ein zeitlicher Spannungsanstieg festgestellt. Durch eingehende Gasanalysen wurde nachgewiesen, dass dieser Spannungsanstieg durch den aus dem Wasserdampf der Luft stammenden Wasserstoff verursacht sei. Es wird auf Fälle hingewiesen, wo frühere Messresultate durch diesen Einfluss der Luftfeuchtigkeit gefälscht sein könnten.

2. In einer Atmosphäre sorgfältig getrockneter Luft wurden in einem Druckbereich von einer Atmosphäre bis zu 5 mm Hg die Charakteristiken des normalen Kohlebogens von 4 bis 13 mm Länge bei einer Stromstärke von 3 bis 16 Amp. aufgenommen.

a) Im ganzen Bereich verlaufen die Charakteristiken hyperbelförmig.

b) Die Frölich'sche Gleichung ist befriedigend erfüllt.

c) Die Abhängigkeit der Spannung vom Druck cet. par. lässt sich durch eine Gleichung von folgender Form ausdrücken:

$$V = d \lg p. + c.$$

d) Folgende erweiterte Ayrton'sche Gleichung genügt den Beobachtungen:

$$V = \frac{(0.44\, l + 6.40) \lg p + 0.85\, l + 20.1 + (-4.22\, l + 23.3) \lg p + 18.2 - 16}{i}$$

Die unter c) erwähnte Druckabhängigkeit gilt nicht nur für den Kohlebogen, und sie behält ihre Gültigkeit auch bei einem Druck von mehreren Atmosphären.

3. Aus den Ayrton'schen Konstanten werden Werte für Anoden-Kathodenfall und Gefälle in der Gassäule abgeleitet. Anodenfall und Gefälle in der Gassäule nehmen mit sinkendem Druck stark ab, der Kathodenfall weniger.

4. Bei einem Druck von weniger als 80 mm Hg werden mannigfaltige Modifikationen des Bogens beobachtet; doch nur von einer Form, die mit dem „Glimmbogen" identisch sein dürfte, konnte die Charakteristik aufgenommen werden, sie war hyperbelförmig. Da die „Zwischenformen" unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht reproduzierbar waren, liess sich keine systematische Klassifikation aufstellen.

Literatur.

1. Hörburger, Diss. Greifswald 1905.
2. Ayrton, The electric arc, London 1909.
3. Marx, Handbuch der Radiologie, Hagenbach, Der elektrische Lichtbogen, 2. Auflage. Leipzig 1924.
4. Graetz, Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Band III, p. 521—596, Lichtbogen Bräuer, Leipzig 1921.
5. Davy, Elemente des chemischen Teiles der Naturwissenschaften, Berlin 1814, übersetzt von Fr. Wolff.
6. Davy, Phil. Trans. 1821, Part. I, p.7.
7. Van Breda, C. R. **23,** 1846, p. 462.
8. Grove, Fortschritte der Phys., II. 1846.
9. Boussignault, C. R. **21,** 1845, p. 515.
10. Matteucci, C. R. **30,** 1850, p. 201.
11. Despretz, C. R. **36,** 1853, p. 176.
12. Gassiot, Proc. R. S. London, **10,** 1860, p. 393.
13. Edlund, Pogg. Ann. **131,** 1867, p. 586.
14. de la Rue und Müller, Phil. Trans. **171,** 1880, p. 65.
15. Hittdorf, Wied. Annal. **21,** 1884, p. 90.
16. Stenger, Wied. Ann. **25,** 1885, p. 31.
17. Lehmann, Wied Ann., **55,** 1895, p. 361.
18. Duncan, Rowland and Todd, E. T. Z. **14,** 603. 1893.
19. Monasch, 3 E.T.Z. **44,** 1902, p. 957.
20. Arons, Ann. Phys. **1,** 1900. p. 700.
21. Child, Phys. Rev. **19,** 1904, 117.
22. Child, Phys. Rev. **20,** 1905, 364.
23. Simon und Malcolm, Phys. ZS. **8,** 1907, p. 471.
24. Cady und Arnold, Phys. Z S. **8,** 1907, p. 890.
25. Fabry et Buisson, Journ. Phys. (4) **9,** 1910, p. 929.
26. Hagenbach und Veillon, Verh. d. Naturf. Ges. Basel **21,** 1910, p. 66.
27. Hagenbach und Veillon, Phys. ZS. **11,** 1910, p. 833.
28. Banderet, Diss. Basel 1912.
29. Frey, Ann. Phys. (4) **49,** 1916, p. 937.
30. Grotrian, Ann. Phys. (4) **47,** 1915, p. 141.
31. Chrisler, Astrophys. Journ. **54,** 1921, p. 273.
32. Moore, Astrophys. Journ. **54,** 1921, p. 246 und 191.
33. Kohn und Guckel, ZS. f. Phys. **27,** 1924, p. 305.
34. Hagenbach, Verhandl. d. Naturf. Ges. Basel, Bd. XXX, p. 36.
35. Stockhausen, Der eingeschlossene Lichtbogen bei Gleichstrom.
36. Hempel, Die gasanalytischen Methoden.
37. Seeliger, Phys. ZS. **27,** 1926, p. 22.
38. Matthies, Verhandl. d. Deutschen Phys. Ges. **13,** 1911, p. 552.

39. Günther-Schulze, Phys. ZS. **11**, 1922, p. 74.
40. Rasch, Das elektrische Bogenlicht, Braunschweig 1910.
41. Wehrli und Baumann, Phys. ZS. **38**, 1926, p. 37.
42. Günther-Schulze, ZS. f. Phys. **31**, 1925, p. 509.
43. Cady, Phys. ZS. **14**, 1913, p. 296.
44. Stolt, ZS. f. Phys. **26**, p. 950 und l. c. 31, p. 240.
45. Slepian, Phys. Rev. **27** (2), 1926, p. 413.
46. Compton, Phys. Rev. **21** (2), 1923, p. 266 und 382.
47. Günther-Schulze, ZS. f. Phy. **11**, 1923, p. 260.
48. Bräuer, Ann. d. Phys. **60**, 1919, p. 95.
49. Stark, Phys. ZS. **5**, 1903, p. 56.
50. Mathiesen, Untersuchungen über den elektrischen Lichtbogen. Leipzig 1921.
51. Schüler, ZS. f. Phys. **14**, 1923, p. 32.
52. Partzsch, ZS. f. Phys. **15**, 1923, p. 287.
53. Günther-Schulze, ZS. f. Phys. **13**, 1923, p. 378.
54. Palmén und Väyrynen, Phys. Ber. IV, 1923, p. 592.
55. Landolt-Börnstein, Phys. chemische Tabellen, 5. Aufl., p. 848/49.
56. Compton und Mohler, Fortschritte der Chemie, Phys. und phys. Chemie, Bd. 18, Heft 6, p. 131, 133.

Vita.

Ich, Max Martin Bider, wurde am 13. Mai 1899 in Basel geboren als Sohn des Dr. med. Max Bider (gestorben 10. Mai 1922), von Basel und Langenbruck, und seiner Gattin Theodora Staehelin von Basel. Ich besuchte die Primarschule, das untere Gymnasium und die obere Realschule und bestand im Herbst 1918 die Maturität. (Ergänzungsmaturität in Latein, Frühjahr 1919.) Nach erfolgter Immatrikulation an der hiesigen Universität, widmete ich mich dem Studium der Physik, Astronomie und Mathematik, wobei ich in den ersten Semestern auch Vorlesungen allgemeinen Interesses belegte. Seit Frühjahr 1924 versah ich die Stelle des Assistenten der astronomisch-meteorologischen Anstalt. Meine Studienzeit wurde zweimal durch längere Krankheit unterbrochen.

Ich besuchte Vorlesungen und Übungen der folgenden Herren Dozenten:

H. Bächtold, H. Barth, Braun, R. Doerr, F. Fichter, A. Hagenbach, K. Joel, M. Knapp, E. Mahler, W. Matthies, H. Mohrmann, Th. Niethammer, F. Rintelen, H. Rupe, O. Spiess, E. Staehelin, H. Veillon, L. Zehnder, H. Zickendraht.

Die vorliegende Arbeit begann ich 1922 auf Anregung und unter Leitung von Herrn Prof. Dr. A. Hagenbach. Es ist mir eine angenehme Pflicht, meinen verehrten Lehrern zu danken für die vielfache Anregung und Belehrung, die ich bei ihnen habe geniessen dürfen. Insbesondere möchte ich Herrn Prof. Dr. A. Hagenbach meinen herzlichsten Dank aussprechen für das stets fördernde Interesse, das er mir während meiner Arbeit entgegengebracht hat.

Publikation.

Gemeinsam mit Herrn Prof. Dr. A. Hagenbach: A. Hagenbach und M. Bider, Arch. d. sciences phys. et nat. (5) 8, 1926, p. 150.